แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับการสื่อสารแถบกว้าง

KNIFE-EDGE DIFFRACTION MODEL FOR WIDEBAND COMMUNICATIONS

อรรถวุฒิ วานิช

ATTAWUT VANICH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-010-149

แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับการสื่อสารแถบกว้าง

KNIFE-EDGE DIFFRACTION MODEL FOR WIDEBAND COMMUNICATIONS

อรรถวุฒิ วานิช
ATTAWUT VANICH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-010-149

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KNIFE-EDGE DIFFRACTION MODEL FOR WIDEBAND COMMUNICATIONS

ATTAWUT VANICH

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-M-010-149

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2016
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับการสื่อสารแถบกว้าง
Thesis Title Knife-Edge Diffraction Model for Wideband Communications
นักศึกษา นายอรรถวุฒิ วานิช
รหัสประจำตัว 57601149
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พิชญ สุพรรณกูล
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-010-149

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชูวงค์	พงศ์เจริญพาณิชย์	
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาคีพงษ์	
ศ.ดร.ประยุทธ	อัครเอกฒาลิน	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	
ผศ.ดร.พิชญ	สุพรรณกูล	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับการสื่อสารแถบกว้าง
นักศึกษา	นายอรรถวุฒิ วานิช
รหัสประจำตัว	57601149
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พิชญ สุพรรณกูล

บทคัดย่อ

การสื่อสารแถบกว้างเป็นที่คาดหวังสำหรับนำมาใช้ในโครงข่ายพื้นที่ส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network: WPAN) และโครงข่ายภายในบ้าน ซึ่งเป็นไปได้ว่าสัญญาณจะถูกกีดขวางโดยวัสดุต่าง ๆ ที่อยู่ภายในอาคาร ปรากฏการณ์เลี้ยวเบนเป็นอีกหนึ่งคุณลักษณะสำคัญที่จะพิจารณาในส่วนของการแพร่กระจายช่องสัญญาณแถบกว้าง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับสัญญาณแถบกว้าง โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 3 GHz เป็นสัญญาณส่งแถบกว้าง ได้ขยายแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมให้อยู่ในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณ หลังจากนั้น ได้นิยามและศึกษาอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างที่อยู่บนพื้นฐานกำลังเฉลี่ย และท้ายสุดได้ศึกษาความเที่ยงตรงของแบบจำลองขอบเหลี่ยมคมโดยเปรียบเทียบกับผลการวัด จากผลที่ได้ แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับสัญญาณแถบกว้างนี้สามารถใช้ศึกษาคุณสมบัติการเลี้ยวเบนได้ในแต่ละกรณี มีอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างใกล้เคียงกับอัตราขยายแถบแคบที่ความถี่กลาง และมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการวัด โดยมีค่าผิดพลาดรากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square: RMS) เท่ากับ 1.04 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Knife-Edge Diffraction Model for Wideband Communications
Student	Mr.Attawut Vanich
Student ID	57601149
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Pichaya Supanakoon

ABSTRACT

Wideband communications are intended to be used in wireless personal area network (WPAN) and home networking, which has any probably obstruct signal by building material. The diffraction phenomenon is one of the most considering characters with part of wideband channel propagation. This thesis presents knife-edge diffraction model for wideband signal. The rectangular passband waveform with frequency ranged from 1 to 3 GHz is used as wideband transmitted signal. The knife-edge diffraction model is applied in the term of complex channel frequency transfer function. After that, the wideband diffraction gain based on average power is defined and studied. Finally, the accuracy of knife-edge diffraction model is studied by comparing with the measurement result. From the results, this knife-edge diffraction model for wideband signal can be used to study each case of diffraction characteristics. The wideband diffraction gain is similar to the narrow band diffraction with center frequency and corresponds very well to measurement results with 1.04 dB root mean square (RMS) error.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความเมตตา ได้รับความรู้ ได้รับประสบการณ์ และได้รับการชี้แนวทางอย่างถูกต้องและเหมาะสม ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิด จาก ผศ.ดร.พิชญ สุพรรณกูล อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ที่ได้ให้โอกาสแก่ข้าพเจ้าได้ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องและตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความรับผิดชอบต่องานวิจัยชิ้นนี้ ข้าพเจ้าได้กราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

กราบขอบพระคุณ ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ท่านได้ให้ความเมตตาแก่ข้าพเจ้าเสมือนลูกหลานของท่าน ตลอดจน เสนอข้อคิด แนวทางในงานวิจัยและได้กรุณาเอื้อเฟื้ออุปกรณ์เพื่อเป็นประโยชน์อย่างสูงต่อการนำมาทดลองในงานวิจัยแก่ข้าพเจ้า

กราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ท่านได้ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลองตลอดจนอุปกรณ์ที่ใช้ให้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีแก่ลูกศิษย์คนนี้ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณอภิสิทธ์ อาจอาสา คุณอาที่รักยิ่ง ได้เสียสละเวลา กำลังและการช่วยเหลือในงานทดลองให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณน้องวิภัสสร วินิจฉัยกุล น้องสิรภพ มิ่งมณี ที่ได้ให้ข้อมูลและการช่วยเหลืออย่างจริงใจเป็นอย่างดี ขอขอบคุณพี่สิทธิชัย เด่นตรี พี่รัศมิทัต แผนสมบูรณ์ และพี่สนิท เตียวฉิ้ม ที่ได้ให้ข้อแนะนำและมีส่วนในการส่งเสริมงานวิจัยชิ้นนี้

ท้ายที่สุดนี้ กราบขอบพระคุณ คุณพ่อพัฒนวงษ์ วานิช และ คุณแม่แน่งน้อย วานิช ที่เป็นส่วนสำคัญยิ่งแก่ข้าพเจ้า ในการส่งเสริมผลักดัน เข้าใจและตระหนักถึงความสำคัญของการศึกษาที่มีแก่ลูกคนนี้มาตลอด

อรรถวุฒิ วานิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง VI
สารบัญรูป VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์ VIII

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา 1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย 2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีแบบพื้นฐาน 2
1.6 ขอบเขตการวิจัย 2
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา 3

บทที่ 2 ทฤษฎีการเลี้ยวเบน 4
2.1 บทนำ 4
2.2 หลักการของฮอยเกนส์-เฟรสเนล 4
2.3 พารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรสเนล-เคอร์ชอฟฟ์ 5
2.4 รัศมีของเขตเฟรสเนลแรก 6
2.5 สูตรอินทิกรัลของเคอร์ชอฟฟ์ 7
2.6 หลักการขดเป็นวงของคอร์นู 8
2.7 แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม 10
2.8 บทสรุป 13

บทที่ 3 แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับการสื่อสารแถบกว้าง 14
3.1 บทนำ 14
3.2 สัญญาณส่งแถบกว้าง 14
3.3 ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนของช่องสัญญาณ 15
3.4 สัญญาณที่รับได้ 16
3.5 อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้าง 16
3.6 บทสรุป 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบกับผลการวัด	18
4.1 บทนำ	18
4.2 สัญญาณส่งรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม	18
4.3 ช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแถบกว้าง	19
4.4 สัญญาณการเลี้ยวเบนแถบกว้าง	26
4.5 อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้าง	28
4.6 การเปรียบเทียบกับผลการวัด	29
4.7 บทสรุป	31
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	32
5.1 สรุปผลการวิจัย	32
5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนางานวิจัย	34
เอกสารอ้างอิง	35
ภาคผนวก ก. คู่มือการใช้สายอากาศทรงกรวยบิดเกลียวรูปก้นหอย	36
ภาคผนวก ข. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์	45
ประวัติผู้เขียน	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า
4.1 พารามิเตอร์ของสัญญาณส่งรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม ... 18
4.2 พารามิเตอร์ของช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแถบกว้าง ... 19
4.3 การแบ่งกรณีการวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ ... 21
4.4 พารามิเตอร์ทางสถิติของขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ ... 22
4.5 พารามิเตอร์ทางสถิติของเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ ... 22
5.1 คุณสมบัติของขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ ... 32
5.2 คุณสมบัติของเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ ... 33
5.3 คุณสมบัติของแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณการเลี้ยวเบนที่รับได้ ... 33
5.4 คุณสมบัติของเวลาการประวิงของสัญญาณการเลี้ยวเบนที่รับได้ ... 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ปรากฏการณ์เลี้ยวเบนจากหลักการของฮอยเกนส์-เฟรสเนล	4
2.2	การนิยามเขตเฟรสเนลบนเส้นทาง LOS ของการแพร่กระจายคลื่น	5
2.3	รูปเรขาคณิตของการแพร่กระจายคลื่นผ่านเขตเฟรสเนล	5
2.4	ฟังก์ชันอินทิกรัลโคไซน์เฟรสเนล	9
2.5	ฟังก์ชันอินทิกรัลไซน์เฟรสเนล	9
2.6	หลักการขดเป็นวงของคอร์นู	10
2.7	อัตราขยายการเลี้ยวเบนของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม	12
3.1	รูปเรขาคณิตของช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม	15
4.1	สัญญาณส่งรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม	18
4.2	ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่งรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม	19
4.3	ความสูงของเขตเฟรสเนลแรก	20
4.4	ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 1	21
4.5	เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 1	21
4.6	ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 2	23
4.7	เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 2	23
4.8	ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 4	24
4.9	เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 4	24
4.10	ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 5	25
4.11	เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 5	25
4.12	สัญญาณที่รับได้ในกรณีที่ 1	26
4.13	สัญญาณที่รับได้ในกรณีที่ 2	26
4.14	สัญญาณที่รับได้ในกรณีที่ 3	27
4.15	สัญญาณที่รับได้ในกรณีที่ 4	27
4.16	สัญญาณที่รับได้ในกรณีที่ 5	28
4.17	อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างเทียบกับแถบแคบ	28
4.18	แบบจำลองการวัด	29
4.19	รูปเรขาคณิตของสิ่งกีดขวางแผ่นอะลูมิเนียม	30
4.20	สายอากาศทรงกรวยบิดเกลียวรูปก้นหอย	30
4.21	อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างเทียบกับผลการวัด	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

เส้นทางการมองเห็น (Line-of-Sight)	LOS
ไม่มีเส้นทางการมองเห็น (Non-Line-of-Sight)	NLOS
รากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square)	RMS
แถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband)	UWB
โครงข่ายพื้นที่ส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network)	WPAN
เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer)	VNA
จิกะเฮิร์ทซ์ (Gigahertz)	GHz
เมกะเฮิร์ทซ์ (Megahertz)	MHz
เฮิร์ทซ์ (Hertz)	Hz
โวลต์ (Volt)	V
วัตต์ (Watt)	W
เดซิเบล (Decibel)	dB
เดซิเบลเทียบกับกำลัง 1 mW (Decibel Relative to Power of 1 mW)	dBm
เมตร (Meter)	m
มิลลิวัตต์ (Milliwatt)	mW
มิลลิเมตร (Millimeter)	mm
นาโนวินาที (Nanosecond)	ns
เรเดียน (Radian)	rad
วินาที (Second)	s
องศา (Degree)	$^{\circ}$
แอมพลิจูดสูงสุด (Maximum Amplitude), V	A
ขนาดของความเข้มสนามไฟฟ้าในช่องสัญญาณการเลี้ยวเบน (Magnitude of Electric Field Intensity in Diffraction Channel), V/m	E
ขนาดของความเข้มสนามไฟฟ้าในช่องสัญญาณอวกาศว่าง (Magnitude of Electric Field Intensity in Free Space Channel), V/m	E_0
อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้าง (Wideband Diffraction Gain), dB	G_d
อัตราขยายการเลี้ยวเบน (Diffraction Gain)	H_d
สัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 (Transmission Coefficient from Port 1 to Port 2)	S_{21}
ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ (Spectral Density of Received Signal), V/Hz	V_r
ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่ง (Spectral Density of Transmitted Signal), V/Hz	V_t
ความเร็วแสง (Speed of light), m/s	c
ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับ (Distance between Transmitter and Receiver Antennas), m	d

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งกับสิ่งกีดขวาง (Distance between Transmitter Antenna and Obstruction), m	d_1
ระยะทางระหว่างสายอากาศรับกับสิ่งกีดขวาง (Distance between Receiver Antenna and Obstruction), m	d_2
ระยะทางของเส้นที่ลากจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ (Distance of Line from Transmitter Antenna to Receiver Antenna), m	d'
ความถี่ (Frequency), Hz	f
ความถี่สูงสุด (Highest Frequency), Hz	f_H
ความถี่ต่ำสุด (Lowest Frequency), Hz	f_L
แบนด์วิดท์ (Bandwidth), Hz	f_b
ความถี่กลาง (Center Frequency), Hz	f_c
ความสูงของสิ่งกีดขวาง (Height of Obstruction), m	h
ความสูงสูงสุดของเขตเฟรสเนลแรก (Highest Height of First Fresnel Zone), m	h_H
ความสูงต่ำสุดของเขตเฟรสเนลแรก (Lowest Height of First Fresnel Zone), m	h_L
ความสูงของสายอากาศรับ (Height of Receiver Antenna), m	h_r
ความสูงของสายอากาศส่ง (Height of Transmitter Antenna), m	h_t
ความสูงของเส้นที่ลากจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับที่ตำแหน่งสิ่งกีดขวาง (Height of Line from Transmitter Antenna to Receiver at Obstruction Position), m	h'
หมายเลขคลื่น (Wave Number), rad/m	k
รัศมีของเขตเฟรสเนล (Radius of Fresnel Zone), m	r
รัศมีของเขตเฟรสเนลแรก (Radius of First Fresnel Zone), m	r_1
รัศมีของเขตเฟรสเนลที่ n (Radius of n^{th} Fresnel Zone), m	r_n
เวลา (Time), s	t
สัญญาณที่รับได้ (Received Signal), V	v_r
สัญญาณส่ง (Transmitted Signal), V	v_t
ระยะทางส่วนเกิน (Excess Distance), m	Δd
ความต่างเฟส (Phase Difference), rad	$\Delta\phi$
ความยาวคลื่น (Wavelength), m	λ
ความยาวคลื่นที่ความถี่สูงสุด (Wavelength of Highest Frequency), m	λ_H
ความยาวคลื่นที่ความถี่ต่ำสุด (Wavelength of Lowest Frequency), m	λ_L
พารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรสเนล-เคอร์ชอฟฟ์ (Fresnel-Kirchhoff Diffraction Parameter)	ν

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารแถบกว้างได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการการสื่อสารที่มีความจุมากและอัตราการส่งข้อมูลสูง ซึ่งใช้ทั้งในโครงข่ายพื้นที่ส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network: WPAN) [1], [2] และโครงข่ายภายในบ้าน [3] โดยสามารถให้บริการการสื่อสารข้อมูลได้หลายรูปแบบทั้งสัญญาณภาพและเสียงพร้อมกัน มีการใช้แถบความถี่หรือสเปกตรัมในการสื่อสารที่กว้างในการส่งและรับข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบดิจิตอล ทำให้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งภายในและภายนอกอาคาร ซึ่งอาจมีสภาวะแวดล้อมที่สัญญาณแถบกว้างถูกบดบังจากวัสดุหรือสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ที่ส่งผลทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณสื่อสารทางภาครับได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่นระยะทางการสื่อสาร คุณสมบัติของสายอากาศ ชนิดและรูปร่างของวัสดุสิ่งกีดขวางเป็นต้น ดังนั้น แบบจำลองการเลี้ยวเบนจึงเป็นแบบจำลองหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับนำมาใช้วิเคราะห์หาคุณสมบัติและทำนายระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในระบบการสื่อสารไร้สายแถบกว้าง แบบจำลองการเลี้ยวเบนที่ได้ศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือนำแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแบบดั้งเดิม [4] ซึ่งเป็นการพิจารณาที่ความถี่เดียวหรือสำหรับการสื่อสารแถบแคบ มาประยุกต์ใช้พิจารณาในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนสำหรับการสื่อสารแถบกว้าง เพื่อสอดคล้องกับความต้องการความจุและอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นในปัจจุบัน โดยวิเคราะห์ศึกษาหาคุณสมบัติอัตราการเลี้ยวเบนแถบกว้างตามการเปลี่ยนแปลงความสูงของสิ่งกีดขวางรวมทั้งได้ศึกษาความเที่ยงตรงของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมนี้ โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากผลการวัด

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาความเที่ยงตรงของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมโดยทำการเปรียบเทียบกับผลการวัด ดังนั้น จึงได้กำหนดสมมติฐานในแบบจำลองการวัดให้ใกล้เคียงกับสมมติฐานของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมมากที่สุด นั่นคือ ได้ทำการวัดช่องสัญญาณการเลี้ยวเบนในห้องไร้การสะท้อนเพื่อจำลองให้เป็นสภาวะแวดล้อมอวกาศว่าง และได้เลือกใช้แผ่นอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นวัสดุตัวนำที่ดี มีน้ำหนักเบา ราคาไม่แพงมาก มาเป็นสิ่งกีดขวาง เพื่อจำลองให้เป็นสิ่งกีดขวางตัวนำสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณส่งแถบกว้าง เนื่องจากเป็นสัญญาณที่มีสมการในรูปแบบปิดทั้งในโดเมนเวลาและความถี่ รวมทั้งยังสามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามที่ต้องการได้ง่าย [5] ในส่วนของช่องสัญญาณการเลี้ยวเบน ได้ทำการขยายแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแบบดั้งเดิม [4] ซึ่งพิจารณาที่จุดความถี่เดียว มาอยู่ในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณเชิงซ้อน ทำให้สามารถคำนวณหาความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรับได้ในโดเมนความถี่ แล้วทำการแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับให้ได้รูปคลื่นของสัญญาณรับในโดเมนเวลา ได้นิยามอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างบนพื้นฐานอัตราขยายกำลังเฉลี่ย ซึ่งเป็นอัตราของกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้ต่อกำลังเฉลี่ยของสัญญาณส่ง

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

ในการศึกษาการเลี้ยวเบน ทฤษฎีที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนคือหลักการของฮอยเกนส์-เฟรสเนล (Huygens-Fresnel) [6], [7] ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าแต่ละจุดบนหน้าคลื่นสามารถพิจารณาเป็นแหล่งกำเนิดที่มีการแผ่กระจายคลื่นใหม่ได้ ต่อมาได้มีการพัฒนาสูตรอินทิกรัลของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff) [8] สำหรับการอินทีเกรตในหนึ่งมิติ ซึ่งสูตรนี้จะกลายเป็นแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมที่นิยมใช้หาคุณสมบัติและวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของสัญญาณแถบแคบ หลังจากนั้น ได้มีการพัฒนาแบบจำลองขอบเหลี่ยมคมมาหาคุณสมบัติและวิเคราะห์สัญญาณแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wideband: UWB) [9] ถึงแม้ว่าแบบจำลองนี้สามารถให้ผลปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนทางทฤษฎีอย่างมีเหตุผล แต่ก็ยังไม่ได้มีการศึกษาความเที่ยงตรงของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัด

1.6 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาเชิงทดลองของการเลี้ยวเบนแถบกว้าง โดยได้ใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 3 GHz เป็นสัญญาณส่งแถบกว้าง ได้ทำการขยายแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมให้อยู่ในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อน โดยกำหนดให้ช่องสัญญาณขอบเหลี่ยมคมมีระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็น 3 m สายอากาศส่งและสายอากาศรับสูง 1 m มีสิ่งกีดขวางอยู่ตรงกลาง สิ่งกีดขวางมีความสูงตั้งแต่ 0 ถึง 2 m หลังจากนั้นคำนวณหารูปคลื่นสัญญาณที่รับได้ เพื่อใช้วิเคราะห์หาและศึกษาอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างซึ่งได้นิยามให้อยู่บนพื้นฐานกำลังเฉลี่ย ได้ศึกษาความเที่ยงตรงของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแถบกว้างนี้โดยเปรียบเทียบกับผลของการวัด ซึ่งในการวัดได้ใช้แบบแผนการวัดที่ได้นำเสนอไว้ใน [10] โดยได้วัดช่องสัญญาณในห้องไร้การสะท้อน ใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นสิ่งกีดกวาง ใช้สายอากาศทรงกรวยบิดเกลียวรูปก้นหอยเป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับ และใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer: VNA) วัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณเชิงซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง บทนำ ซึ่งประกอบไปด้วยความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย การเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีการเลี้ยวเบน ซึ่งประกอบไปด้วย บทนำ หลักการของฮอยเกนส์-เฟรสเนล พารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรสเนล-เคอร์ชอฟฟ์ รัศมีของเขตเฟรสเนลแรก สูตรอินทิกรัลของเคอร์ชอฟฟ์ หลักการขดเป็นวงของคอร์นู แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม และบทสรุป

บทที่ 3 กล่าวถึง แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับการสื่อสารแถบกว้าง ซึ่งประกอบไปด้วย บทนำ สัญญาณส่งแถบกว้าง ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนของช่องสัญญาณ สัญญาณที่รับได้ อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้าง และบทสรุป

บทที่ 4 กล่าวถึง ผลการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบกับผลการวัด ซึ่งประกอบไปด้วย บทนำ สัญญาณส่งรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม ช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแถบกว้าง สัญญาณการเลี้ยวเบนแถบกว้าง อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้าง การเปรียบเทียบกับผลการวัด และบทสรุป

บทที่ 5 กล่าวถึง สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ซึ่งประกอบไปด้วยสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนางานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีการเลี้ยวเบน

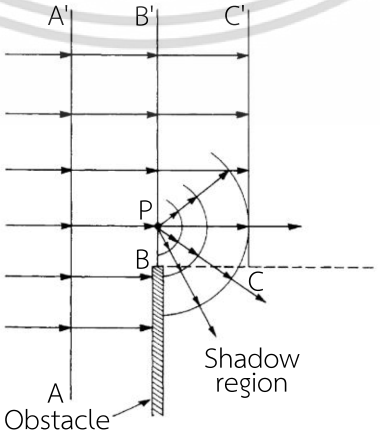
2.1 บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารแถบกว้างได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการการสื่อสารที่มีความจุมากและอัตราการส่งข้อมูลสูง มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งภายในและภายนอกอาคาร ซึ่งอาจมีสภาวะแวดล้อมที่สัญญาณแถบกว้างถูกบดบังจากวัสดุหรือสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ที่ส่งผลทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณสื่อสารทางภาครับได้ ดังนั้น ทฤษฎีการเลี้ยวเบนและสายอากาศจึงมีความสำคัญสำหรับนำมาใช้วิเคราะห์หาคุณสมบัติและทำนายระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในระบบการสื่อสารไร้สายแถบกว้าง

ในบทนี้ จะได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ของการเลี้ยวเบน ซึ่งเป็นทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องที่ถูกนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้กับแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับการสื่อสารแถบกว้างที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.2 หลักการของฮอยเกนส์-เฟรสเนล

หลักการที่นำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ของการเลี้ยวเบนคือหลักการของฮอยเกนส์-เฟรสเนล [6], [7] ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าแต่ละจุดบนหน้าคลื่นสามารถพิจารณาเป็นแหล่งกำเนิดที่มีการแพร่กระจายคลื่นใหม่ได้ รูปที่ 2.1 แสดงปรากฏการณ์เลี้ยวเบนจากหลักการของฮอยเกนส์-เฟรสเนล เมื่อคลื่นระนาบซึ่งแสดงเป็นหน้าคลื่นเส้นตรง AA' ตั้งฉากกับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่เคลื่อนที่จากซ้ายไปขวาดังแสดงด้วยเส้นที่มีลูกศร แต่ละจุดบนหน้าคลื่นจะพิจารณาเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุดที่มีการแพร่กระจายคลื่นไปทุกทิศทาง ทำให้เกิดเป็นหน้าคลื่นทรงกลมขนาดเล็กหลายวงซ้อนกันรวมเป็นหน้าคลื่นเส้นตรง BB' ใหม่ เมื่อมีสิ่งกีดขวางเกิดขึ้นที่ตำแหน่งด้านล่างของเส้นตรง BB' จำนวนแหล่งกำเนิดแบบจุดจะลดลงมีเพียงบนหน้าคลื่นที่อยู่ด้านบนของสิ่งกีดขวาง กำเนิดคลื่นเป็นหน้าคลื่นทรงกลมขนาดเล็กรวมกันเป็นหน้าคลื่นใหม่ที่เส้นตรง CC' และยังมีแหล่งกำเนินแบบจุดบนหน้าคลื่นบางส่วน เช่นแหล่งกำเนิดแบบจุดที่ตำแหน่ง P กำเนิดคลื่นมีทิศทางการแพร่กระจายทำมุมเลี้ยวเบนลงไปด้านหลังของสิ่งกีดขวางซึ่งเรียกว่าเป็นบริเวณเงา ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเลี้ยวเบนของคลื่น

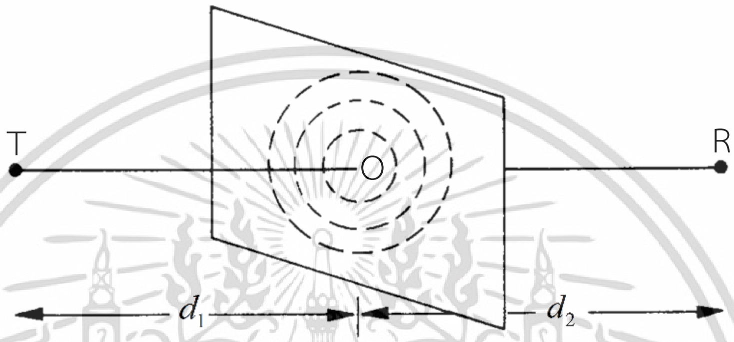


รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์เลี้ยวเบนจากหลักการของฮอยเกนส์-เฟรสเนล [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

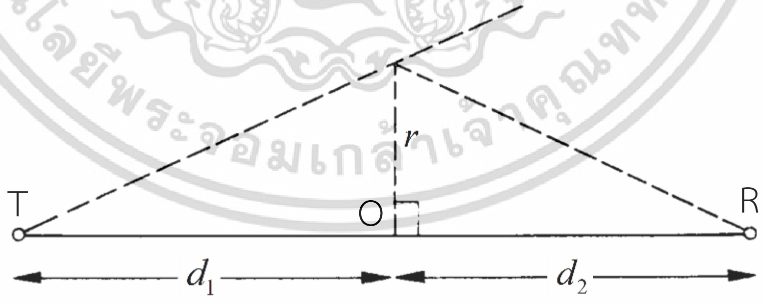
2.3 พารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรสเนล-เคอร์ชอฟฟ์

พารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรสเนล-เคอร์ชอฟ [7] เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบน ขั้นแรกพิจารณาโดยกำหนดให้มีระนาบสิ่งกีดขวางเป็นแผ่นตัวนำสมบูรณ์ตั้งฉากกับเส้นทางการมองเห็น (Line-of-Sight: LOS) ระหว่างสายอากาศส่งที่จุด T กับสายอากาศรับที่จุด R ดังแสดงในรูปที่ 2.2 มีระยะทางระหว่างสายอากาศส่งกับสิ่งกีดขวางเป็น d_1 และระยะทางระหว่างสายอากาศรับกับสิ่งกีดขวางเป็น d_2 บนระนาบสิ่งกีดขวางนี้มีช่องเป็นวงกลมมีจุดศูนย์กลาง O อยู่ที่ LOS และรัศมี r ซึ่งต่อไปรัศมีของวงกลมนี้จะพิจารณาเป็นรัศมีของเขตเฟรสเนล



รูปที่ 2.2 การนิยามเขตเฟรสเนลบนเส้นทาง LOS ของการแพร่กระจายคลื่น [7]

เมื่อคลื่นแพร่กระจายผ่านช่องวงกลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ นอกจากจุดศูนย์กลาง O จะมีระยะทางการเคลื่อนที่มากกว่าระยะทาง TOR โดยมีระยะทางมากที่สุดเมื่อคลื่นแพร่กระจายผ่านช่องวงกลมที่ตำแหน่งเส้นรอบวง ซึ่งอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลาง O เท่ากับ r ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปเรขาคณิตของการแพร่กระจายคลื่นผ่านเขตเฟรสเนล [7]

ผลต่างของระยะทางที่มีค่ามากสุดหาได้จากระยะทางจากจุด T ไปยังตำแหน่งเส้นรอบวงและไปยังจุด R ลบด้วยระยะทาง TOR ซึ่งนิยามเป็นระยะทางส่วนเกิน Δd หาได้จาก

$$\Delta d = \sqrt{{d_1}^2 + r^2} + \sqrt{{d_2}^2 + r^2} - d_1 - d_2 \tag{2.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากอนุกรมเทย์เลอร์ สามารถประมาณเทอมของรากที่สองได้

$$\sqrt{d_1^2 + r^2} \approx d_1 + \frac{r^2}{2d_1} \tag{2.2}$$

$$\sqrt{d_2^2 + r^2} \approx d_2 + \frac{r^2}{2d_2} \tag{2.3}$$

แทนสมการ (2.2) และ (2.3) ลงในสมการ (2.1) จัดรูปใหม่ได้

$$\Delta d = \frac{r^2}{2}\left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right) \tag{2.4}$$

ความต่างเฟส $\Delta\phi$ ที่เกิดจากระยะทางส่วนเกินหาได้จาก

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda} = \frac{\pi r^2}{\lambda}\left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right) \tag{2.5}$$

เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น

กำหนดให้พารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรสเนล-เคอร์ชอฟ ν มีความสัมพันธ์กับความต่างเฟสดังสมการ

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2}\nu^2 \tag{2.6}$$

จากสมการ (2.5) และ (2.6) จัดรูปใหม่ จะได้นิยามของพารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรสเนล-เคอร์ชอฟฟ์เป็น

$$\nu = \sqrt{\frac{2\Delta\phi}{\pi}} = r\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \tag{2.7}$$

2.4 รัศมีของเขตเฟรสเนลแรก

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าควรจะกำหนดรัศมีให้ครอบคลุมขอบเขตที่มีระยะทางส่วนเกินเป็น $n\lambda/2$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มบวก เนื่องจากขอบเขตแต่ล่ะค่า n นี้มีคุณสมบัติเฉพาะของการแพร่กระจายคลื่นจากจุด T ไปยังจุด R ที่แตกต่างกัน และได้เปลี่ยนตัวแปรรัศมีของเขตเฟรสเนล r เป็น r_n ซึ่งนิยามเป็นรัศมีของเขตเฟรสเนลที่ n [11] ดังนั้น จากสมการ (2.4) จะได้

$$\frac{n\lambda}{2} = \frac{r_n^{\,2}}{2}\left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right) \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.8) จัดรูปใหม่ จะได้นิยามของเขตเฟรสเนลที่ n เป็น

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \tag{2.9}$$

จากสมการ (2.9) เมื่อพิจารณาที่เขตเฟรสเนลที่มีรัศมี $r < r_1$ นั่นคือ ระยะทางส่วนเกิน $\Delta d < \lambda/2$ หรือเรียกว่าเขตเฟรสเนลแรก ซึ่งเป็นเขตเฟรสเนลที่สำคัญที่สุดต่อระดับสัญญาณที่รับได้ เนื่องจากแหล่งกำเนิดแบบจุดตามหลักการของฮอยเกนส์-เฟรสเนลบนเขตเฟรสเนลที่หนึ่งนี้มีการรวมกันแบบมีขนาดเสริมกัน ถ้ามีสิ่งกีดขวางอยู่ในบริเวณนี้ ถึงแม้ว่าจะได้ขวางกั้น LOS จะทำให้ระดับของสัญญาณที่รับได้ลดลงอย่างมาก ดั้งนั้น จึงได้นิยามช่องสัญญาณที่ไม่มีสิ่งกีดขวางอยู่ในเขตเฟรสเนลแรกเป็นช่องสัญญาณ LOS จากสมการ (2.9) กำหนดให้ $n = 1$ จะได้นิยามรัศมีของเขตเฟรสเนลแรก r_1 เป็น

$$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \tag{2.10}$$

จากสมการ (2.10) จะเห็นได้ว่า r_1 มีค่ามากที่สุดเมื่อ $d_1 = d_2$ นั่นคือระนาบสิ่งกีดขวางที่พิจารณาอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างจุด T กับ P แต่เมื่อระนาบสิ่งกีดขวางเลื่อนเข้าใกล้จุด T หรือจุด P จะทำให้ r_1 มีค่าลดลง ซึ่งจะทำให้ขอบเขตของเฟรสเนลแรกที่มองจากด้านข้างเป็นรูปวงรี

2.5 สูตรอินทิกรัลของเคอร์ชอฟฟ์

สูตรอินทิกรัลของเคอร์ชอฟฟ์เป็นสูตรสำคัญที่ใช้หาขนาดของคลื่นที่เกิดการเลี้ยวเบน จากรูปที่ (2.3) กำหนดให้อนุพันธ์ของขนาดของความเข้มสนามไฟฟ้า dE ที่จุด R มีความสัมพันธ์กับอนุพันธ์ของรัศมีของเขตเฟรสเนล dr เป็น [8]

$$dE = \frac{Ae^{-jkd}dr}{B(d)} \tag{2.11}$$

เมื่อ A เป็นค่าคงที่ $k = 2\pi/\lambda$ เป็นหมายเลขคลื่น $d = d_1 + d_2$ เป็นระยะทางระหว่างจุด T กับจุด R $B(d)$ เป็นฟังก์ชันของระยะทาง d

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาสูตรอินทิกรัลของเคอร์ชอฟฟ์ใน 1 มิติ คือจะพิจารณารัศมีของเขตเฟรสเนลในแนวตั้งเท่านั้น เพื่อจะนำไปพัฒนาเป็นแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม จากสมการ (2.11) เมื่อคลื่นแพร่กระจายผ่านเขตเฟรสเนลที่มีรัศมีอยู่ในช่วง $r_a < r < r_b$ จะได้ระยะทางในการแพร่กระจายของคลื่นเปลี่ยนจาก d เป็น $d + \Delta d$ ดังนั้น สามารถหาขนาดของความเข้มสนามไฟฟ้า E ที่จุด R ได้จาก

$$E = \frac{Ae^{-jkd}}{B(d)} \int_{r_a}^{r_b} e^{-jk\Delta d} dr \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตรของออยเลอร์ สามาเขียนสมการ (2.12) ใหม่ได้เป็น

$$E = \frac{Ae^{-jkd}}{B(d)}\left(\int_{r_a}^{r_b}\cos(k\Delta d)dr - j\int_{r_a}^{r_b}\sin(k\Delta d)dr\right) \tag{2.13}$$

สมการ (2.12) และ (2.13) เรียกว่าสูตรอินทิกรัลของเคอร์ชอฟฟ์ใน 1 มิติ ซึ่งจะนำไปพัฒนาเป็นแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมต่อไป

2.6 หลักการขดเป็นวงของคอร์นู

หลักการขดเป็นวงของคอร์นู [12] เป็นหลักการสำคัญที่นำมาใช้ช่วยหาผลเฉลยของสูตรอินทิกรัลของเคอร์ชอฟฟ์ กำหนดให้รูปแบบมาตรฐานของอินทิกรัลเฟรสเนลแสดงได้เป็น

$$C(x) - jS(x) = \int_0^x e^{-j\frac{\pi}{2}y^2}dy \tag{2.14}$$

เมื่อ $C(x)$ และ $S(x)$ เป็นฟังก์ชันอินทิกรัลโคไซน์เฟรสเนลและฟังก์ชันอินทิกรัลไซน์เฟรสเนลตามลำดับ มีนิยามเป็น

$$C(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi y^2}{2}\right)dy \tag{2.15}$$

$$S(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi y^2}{2}\right)dy \tag{2.16}$$

กราฟของฟังก์ชันอินทิกรัลโคไซน์เฟรสเนลและฟังก์ชันอินทิกรัลไซน์เฟรสเนลได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่า ฟังก์อินทิกรัลโคไซน์เฟรสเนลและฟังก์ชันอินทิกรัลไซน์เฟรสเนลเป็นฟังก์ชันที่มีความสมมาตรแบบฟังก์ชันคี่ ถ้าค่าโดเมน x เป็นบวก ค่าของฟังก์ชันเป็นบวก ส่วนถ้าค่าโดเมน x เป็นลบ ค่าของฟังก์ชันจะเป็นลบ โดยมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ

$$C(x) = -C(-x) \tag{2.17}$$

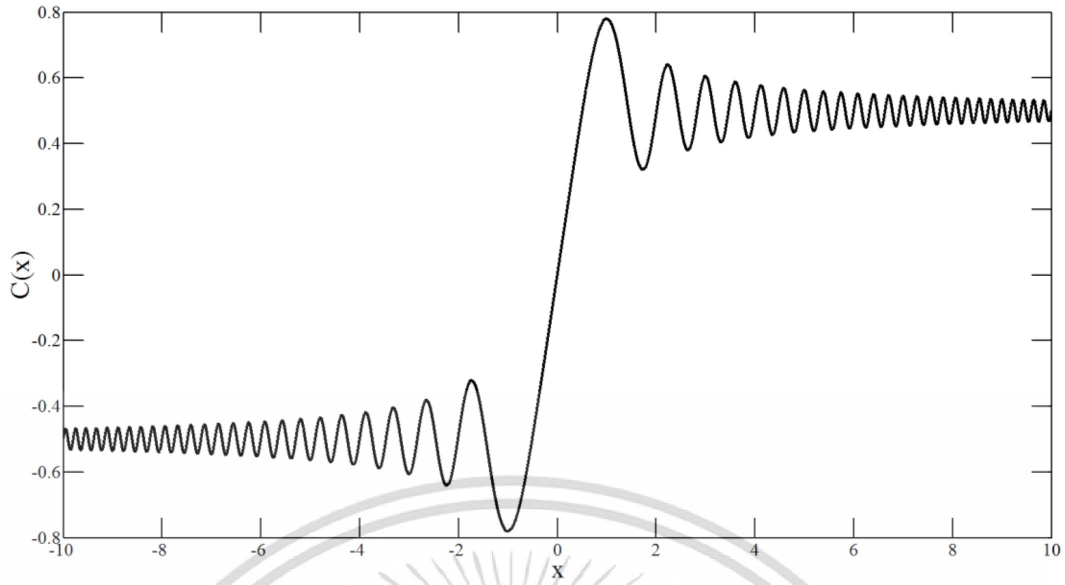
$$S(x) = -S(-x) \tag{2.18}$$

$$C(0) = S(0) = 0 \tag{2.19}$$

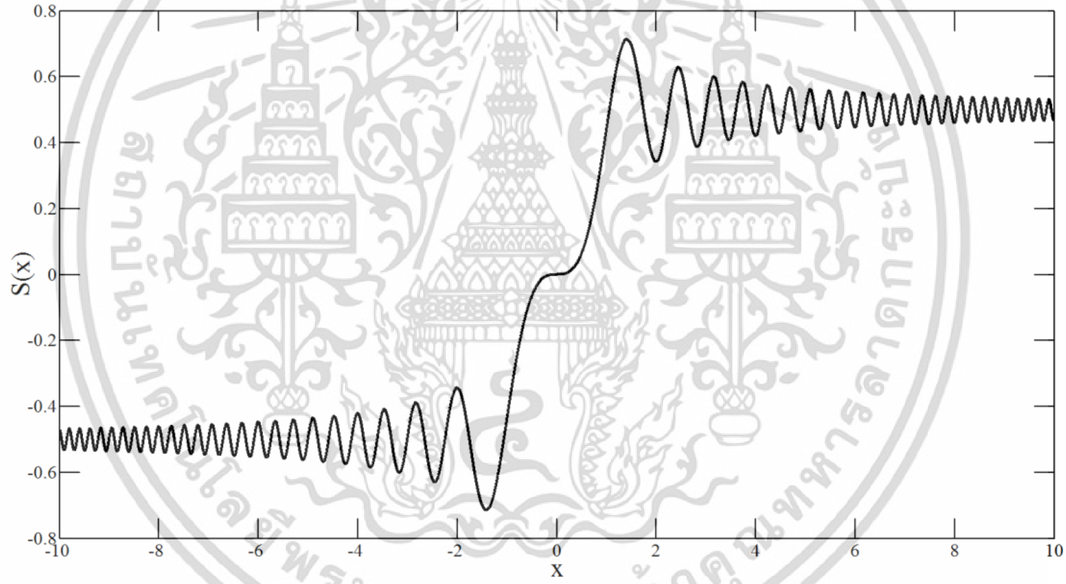
$$\lim_{x\to\infty} C(x) = \lim_{x\to\infty} S(x) = 0.5 \tag{2.20}$$

$$\lim_{x\to-\infty} C(x) = \lim_{x\to-\infty} S(x) = -0.5 \tag{2.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ฟังก์อินทิกรัลโคไซน์เฟรสเนล

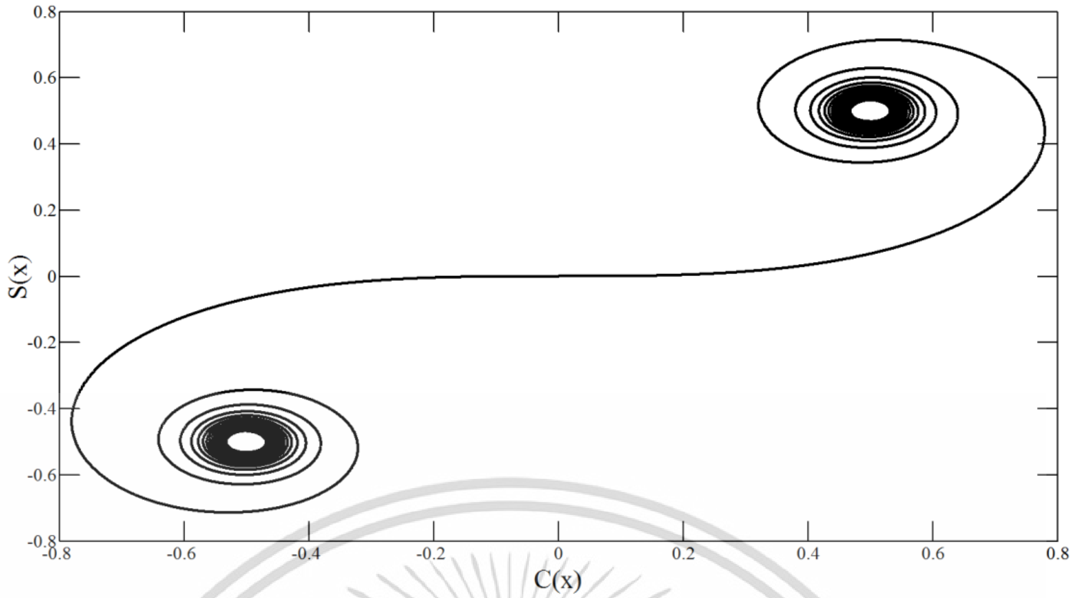


รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันอินทิกรัลไซน์เฟรสเนล

จากรูปแบบมาตรฐานของอินทิกรัลเฟรสเนลที่แสดงในสมการ (2.14) จะเห็นได้ว่ามีส่วนจริงเป็นฟังก์ชันอินทิกรัลโคไซน์เฟรสเนล และมีส่วนจินตภาพเป็นฟังก์ชันอินทิกรัลไซน์เฟรสเนล ดังนั้น จึงนำฟังก์ชันอินทิกรัลโคไซน์เฟรสเนลเป็นแกนนอน และนำฟังก์ชันอินทิกรัลไซน์เฟรสเนลเป็นแกนตั้ง ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งกราฟนี้เรียกว่าหลักการขดเป็นวงของคอร์นู ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

1) เวกเตอร์ที่ลากจากจุดกำเนิด (0,0) ไปยังจุดใด ๆ ของเส้นกราฟ ขนาดและมุมของเวกเตอร์จะสอดคล้องกับขนาดและเฟสของค่าอินทิกรัลในสมการ (2.14)
2) ความยาวของเส้นกราฟที่วัดจากจุดกำเนิด (0,0) จะมีค่าเท่ากับโดเมน x เมื่อโดเมน x มีค่าเข้าสู่ ∞ หรือ $-\infty$ เส้นกราฟจะขดเป็นวงและลู่เข้าที่พิกัด (0.5,0.5) หรือ (–0.5, –0.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 หลักการขดเป็นวงของคอร์นู

2.7 แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม

ในหัวข้อนี้จะทำการหาผลเฉลยสูตรอินทิกรัลของเคอร์ชอฟฟ์ใน 1 มิติ ดังแสดงในสมการ (2.12) เพื่อพัฒนามาเป็นแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม เริ่มจากแทนระยะทางส่วนเกิน Δd ที่แสดงในสมการ (2.4) แทนหมายเลขคลื่น $k = 2\pi/\lambda$ และระยะทาง $d = d_1 + d_2$ ลงในสูตรอินทิกรัลของเคอร์ชอฟฟ์ใน 1 มิติที่แสดงในสมการ (2.12) จัดรูปใหม่ได้

$$E = \frac{Ae^{-j2\pi d/\lambda}}{B(d)} \int_{r_a}^{r_b} e^{-j\frac{\pi}{2}\frac{2dr^2}{\lambda d_1 d_2}} dr \tag{2.22}$$

จากนิยามของพารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรสเนล-เคอร์ชอฟฟ์ ν ที่แสดงในสมการ (2.7) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\nu^2 = \frac{2dr^2}{\lambda d_1 d_2} \tag{2.23}$$

จากสมการ (2.7) หาความสัมพันธ์ของอนุพันธ์ของ r กับอนุพันธ์ของ ν ได้เป็น

$$dr = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{2d}} d\nu \tag{2.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.7) สามารถนิยาม ν_a และ ν_b ซึ่งก็คือพารามิเตอร์ ν เมื่อ r มีค่าเท่ากับ r_a และ r_b ตามลำดับ ได้เป็น

$$\nu_a = r_a\sqrt{\frac{2d}{\lambda d_1 d_2}} \tag{2.25}$$

$$\nu_b = r_b\sqrt{\frac{2d}{\lambda d_1 d_2}} \tag{2.26}$$

นำสมการ (2.23) ถึง (2.26) แทนลงไปในสมการ (2.22) จะได้

$$E = \frac{Ae^{-j2\pi d/\lambda}}{B(d)}\sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{2d}}\int_{\nu_a}^{\nu_b} e^{-j\frac{\pi}{2}\nu^2}\,d\nu \tag{2.27}$$

กำหนดให้มีสิ่งกีดขวางอยู่ด้านล่างอย่างเดียว นั่นคือ r_b มีค่าเข้าสู่ ∞ จากสมการ (2.26) จะได้ ν_b มีค่าเข้าสู่ ∞ แทนลงในสมการ (2.27) จะได้

$$E = \frac{Ae^{-j2\pi d/\lambda}}{B(d)}\sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{2d}}\int_{\nu_a}^{\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}\nu^2}\,d\nu \tag{2.28}$$

สมการ (2.28) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$E = \frac{Ae^{-j2\pi d/\lambda}}{B(d)}\sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{2d}}\left[\int_{0}^{\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}\nu^2}\,d\nu - \int_{0}^{\nu_a} e^{-j\frac{\pi}{2}\nu^2}\,d\nu\right] \tag{2.29}$$

สมการ (2.29) สามารถเขียนให้เป็นรูปแบบมาตรฐานของอินทิกรัลเฟรสเนลดังแสดงในสมการ (2.14) ได้เป็น

$$E = \frac{Ae^{-j2\pi d/\lambda}}{B(d)}\sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{2d}}\left[0.5 - j0.5 - C(\nu_a) + jS(\nu_a)\right] \tag{2.30}$$

กำหนดให้ E_0 เป็นขนาดของความเข้มสนามไฟฟ้าในอวกาศว่าง ซึ่งไม่มีสิ่งกีดขวางเกิดขึ้น นั่นคือ r_a มีค่าเข้าสู่ $-\infty$ ด้วย จากสมการ (2.25) จะได้ ν_a มีค่าเข้าสู่ $-\infty$ แทนลงในสมการ (2.30) จะได้

$$E_0 = \frac{Ae^{-j2\pi d/\lambda}}{B(d)}\sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{2d}}(1-j) \tag{2.31}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

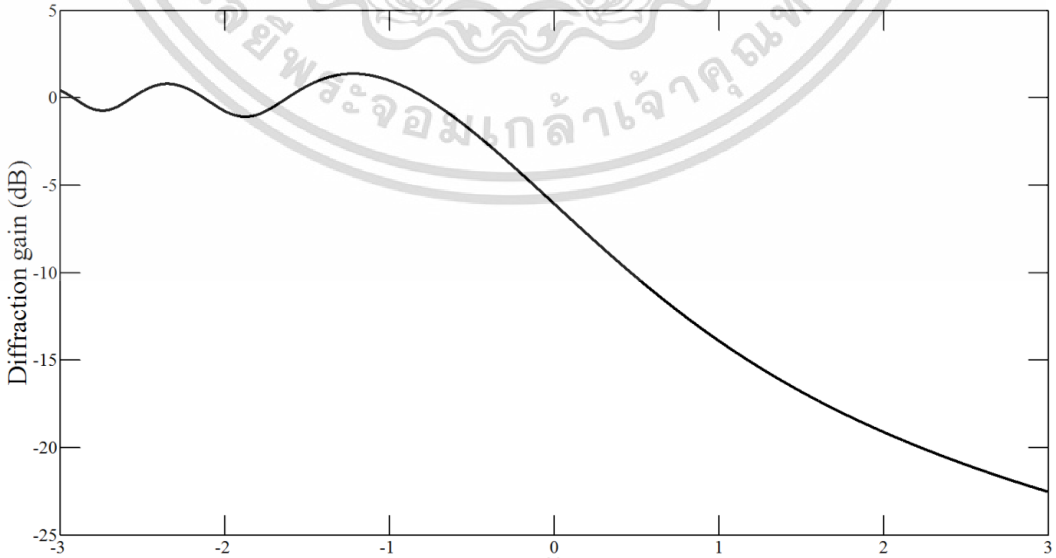
นิยามให้อัตราขยายการเลี้ยวเบนของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม เป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดของความเข้มสนามไฟฟ้าเมื่อมีสิ่งกีดขวางต่อขนาดของความเข้มสนามไฟฟ้าในช่องสัญญาณอวกาศว่าง ซึ่งก็คือ นำสมการ (2.28) หารด้วยสมการ (2.31) จะได้อัตราขยายการเลี้ยวเบน H_d เป็น

$$H_d = \frac{E}{E_0} = \frac{1}{(1-j)}\int_{\nu_a}^{\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}\nu^2} d\nu = \frac{1+j}{2}\int_{\nu_a}^{\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}\nu^2} d\nu \tag{2.32}$$

ทำการเปลี่ยนตัวแปร ν เป็น x และตัวแปร ν_a เป็น ν ในสมการ (2.32) จะได้อัตราขยายการเลี้ยวเบนของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมเป็น [4]

$$H_d = \frac{1+j}{2}\int_{\nu}^{\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}x^2} dx \tag{2.33}$$

รูปที่ 2.7 แสดงอัตราขยายการเลี้ยวเบนของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมเทียบกับพารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรสเนล-เคอร์ชอฟฟ์ จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อ ν น้อยกว่า $-\sqrt{2}$ หรือประมาณ -1.41 ซึ่งเป็นกรณีที่สิ่งกีดขวางไม่ได้อยู่ในบริเวณเขตเฟรสแนลแรก [พิจารณาจากสมการ (2.7) และ (2.10)] อัตราขยายการเลี้ยวเบนมีลักษณะแกว่งโดยมีค่ากลางอยู่ประมาณ 0 dB ซึ่งถือว่าเป็นช่องสัญญาณ LOS การแกว่งเกิดขึ้นจากการแทรกสอดระหว่างแหล่งกำเนิดแบบจุดบนหน้าคลื่นด้านบนของสิ่งกีดขวางตามหลักการของฮอยเกนส์-เฟรสเนล ส่วนเมื่อ ν มีค่ามากกว่า $\sqrt{2}$ ซึ่งเป็นกรณีที่สิ่งกีดขวางอยู่ในบริเวณเขตเฟรสแนลแรก อัตราขยายการเลี้ยวเบนจะมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ ν มีค่าเพิ่มขึ้น กรณีนี้จะพิจารณาเป็นช่องสัญญาณไม่มีเส้นทางการมองเห็น (Non-Line-of-Sight: NLOS)



รูปที่ 2.7 อัตราขยายการเลี้ยวเบนของแบบจำลองขอบเหลี่ยมคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีการเลี้ยวเบน ซึ่งเริ่มจากหลักการของฮอยเกนส์-เฟรสเนล ซึ่งใช้อธิบายปรากฏการณ์การเลี้ยวเบน ต่อมาได้นิยามพารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรสเนล-เคอร์ชอฟฟ์และรัศมีของเขตเฟรสเนลแรก เพื่อใช้ในการหาผลเฉลยของสูตรอินทิกรัลของเคอร์ชอฟฟ์ ซึ่งได้ใช้หลักการขดเป็นวงของคอร์นูช่วยในการหาผลเฉลยได้ง่ายขึ้น ท้ายสุด ทำการหาผลเฉลยอินทิกรัลของเคอร์ชอฟฟ์ใน 1 มิติ พัฒนามาเป็นแบบจำลองการเลี้ยวเบนของเหลี่ยมคมสำหรับการสื่อสารสัญญาณแถบแคบ ซึ่งในบทต่อไป ได้ทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมนี้พิจารณาในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนเพื่อใช้สำหรับการสื่อสารแถบกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับการสื่อสารแถบกว้าง

3.1 บทนำ

ในบทนี้ได้พัฒนาแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแบบดั้งเดิมที่ใช้สำหรับการสื่อสารแถบแคบมาประยุกต์ใช้สำหรับการสื่อสารแถบกว้าง ซึ่งจะกล่าวถึงการนิยามสัญญาณส่งแถบกว้าง การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนของช่องสัญญาณ การวิเคราะห์หาสัญญาณที่รับได้ และการนิยามอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้าง

3.2 สัญญาณส่งแถบกว้าง

สัญญาณส่งแถบกว้างที่ได้ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม [5] โดยมีรูปคลื่นในโดเมนเวลา v_t และฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัม V_t นิยามเป็น

$$v_t(t) = \frac{A}{f_b}\left[f_H \operatorname{sinc}(2f_H t) - f_L \operatorname{sinc}(2f_L t)\right] \tag{3.1}$$

$$V_t(f) = \begin{cases} \dfrac{A}{2f_b} & \left||f| - f_c\right| \le \dfrac{f_b}{2} \\ 0 & \left||f| - f_c\right| > \dfrac{f_b}{2} \end{cases} \tag{3.2}$$

เมื่อ t เป็นเวลา f เป็นความถี่ A เป็นแอมพลิจูดสูงสุด f_b เป็นแบนด์วิดท์ f_c เป็นความถี่กลาง f_L เป็นความถี่ต่ำสุด f_H เป็นความถี่สูงสุด และ

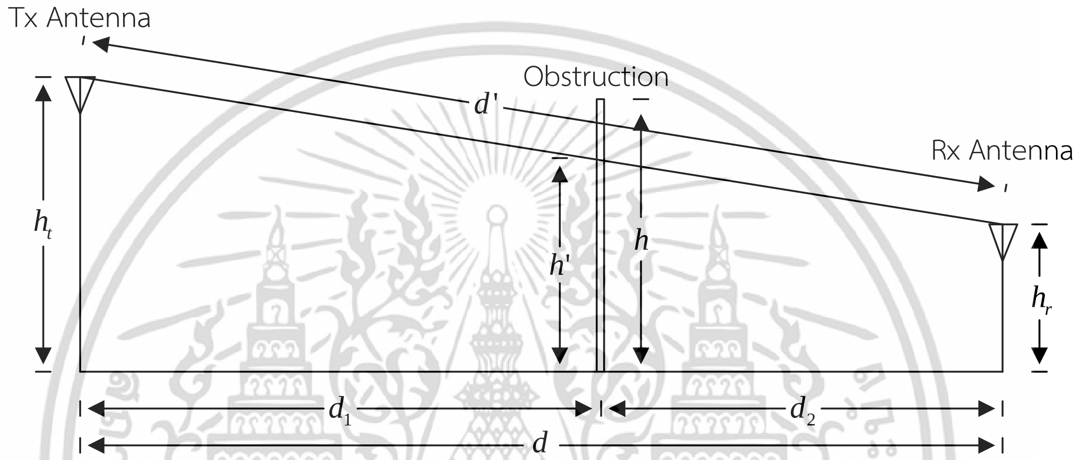
$$\operatorname{sinc}(x) = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ \dfrac{1}{\pi x}\sin(\pi x) & x \ne 0 \end{cases} \tag{3.3}$$

สัญญาณรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมจะมีแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ A ที่เวลา t เท่ากับ 0 ส่วนความหนาแน่นสเปกตรัมจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยจะมีขนาดเท่ากับ $A/(2f_b)$ ที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ $-f_H$ ถึง $-f_L$ และ f_L ถึง f_H ส่วนช่วงความถี่อื่นมีขนาดเป็น 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนของช่องสัญญาณ

รูปเรขาคณิตของช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 กำหนดให้ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็น d ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งกับสิ่งกีดขวางเป็น d_1 ระยะทางระหว่างสายอากาศรับกับสิ่งกีดขวางเป็น d_2 ระยะทางของเส้นตรงที่ลากจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับเป็น d' ความสูงของสายอากาศส่งเป็น h_t ความสูงของสายอากาศรับเป็น h_r ความสูงของสิ่งกีดขวางเป็น h และความสูงของเส้นตรงที่ลากจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับที่ตำแหน่งสิ่งกีดขวางเป็น h'



รูปที่ 3.1 รูปเรขาคณิตของช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม

จากแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมที่แสดงในสมการ (2.33) ซึ่งพิจารณาที่ความถี่เดียวสำหรับการสื่อสารแถบแคบ ได้นำมาพิจารณาในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ เพื่อประยุกต์นำมาใช้สำหรับช่องสัญญาณแถบกว้าง ดังนั้น ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนของช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม สามารถเขียนได้เป็น

$$H_d(f) = \frac{1+j}{2}\int_{v(f)}^{\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}x^2}\,dx \tag{3.4}$$

โดยพารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรสเนล-เคอร์ชอฟฟ์ที่นิยามในสมการ (2.7) และรัศมีของเขตเฟรสเนลแรกที่นิยามในสมการ (2.10) จะถูกพิจารณาเป็นฟังก์ชันของความถี่ กำหนดให้รัศมีของเขตเฟรสเนล $r = h' - h$ และเปลี่ยนตัวแปร $d_1 + d_2$ เป็น d' ดังนั้น สามารถนิยามพารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรสเนล-เคอร์ชอฟฟ์ v เป็นฟังก์ชันของความถี่ได้เป็น

$$v(f) = \frac{\sqrt{2}(h' - h)}{r_1(f)} \tag{3.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รัศมีของเขตเฟรสเนลแรก r_1 ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่สามารถนิยามได้เป็น

$$r_1(f)=\sqrt{\frac{cd_1d_2}{fd'}} \tag{3.6}$$

เมื่อ c เป็นความเร็วแสง

จากรูปที่ 3.1 ระยะทางของเส้นที่ลากจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ d' และความสูงของเส้นที่ลากจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับที่ตำแหน่งสิ่งกีดขวาง h' หาได้จาก

$$d' = \sqrt{d^2+(h_t-h_r)^2} \tag{3.7}$$

$$h'=\frac{d_2h_t+d_1h_r}{d} \tag{3.8}$$

3.4 สัญญาณที่รับได้

ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ V_r คำนวณจากผลคูณระหว่างความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่งกับฟังก์ชันถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม โดยสามารถเขียนได้เป็น

$$V_r(f)=V_t(f)\cdot H_d(f) \tag{3.9}$$

รูปคลื่นของสัญญาณที่รับได้ในโดเมนเวลา v_r คำนวณได้จากการแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับของความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งจะได้

$$v_r(t)=\int_{-\infty}^{\infty}V_r(f)e^{j2\pi ft}df \tag{3.10}$$

3.5 อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้าง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นิยามอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างอยู่บนพื้นฐานของอัตราขยายกำลังเฉลี่ย นั่นคือ เป็นอัตราระหว่างกำลังเฉลี่ยของสัญญาณรับต่อกำลังเฉลี่ยของสัญญาณส่ง อัตราขยายการเลี้ยวเบนในหน่วย dB สามารถเขียนได้เป็น

$$G_d=10\log\left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty}v_r^2(t)dt}{\int_{-\infty}^{\infty}v_t^2(t)dt}\right) \tag{3.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับการสื่อสารแถบกว้าง โดยเริ่มจากการนิยามสัญญาณส่งแถบกว้างเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม และพิจารณาช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อน คำนวณหาสัญญาณที่รับได้ และได้นิยามอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างอยู่บนพื้นฐานของอัตราขยายกำลังเฉลี่ย ในบทต่อไป ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองการเลี้ยวเบนแถบกว้าง และนำผลที่ได้มาศึกษาหาความเที่ยงตรงโดยการเปรียบเทียบกับผลการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบกับผลการวัด

4.1 บทนำ

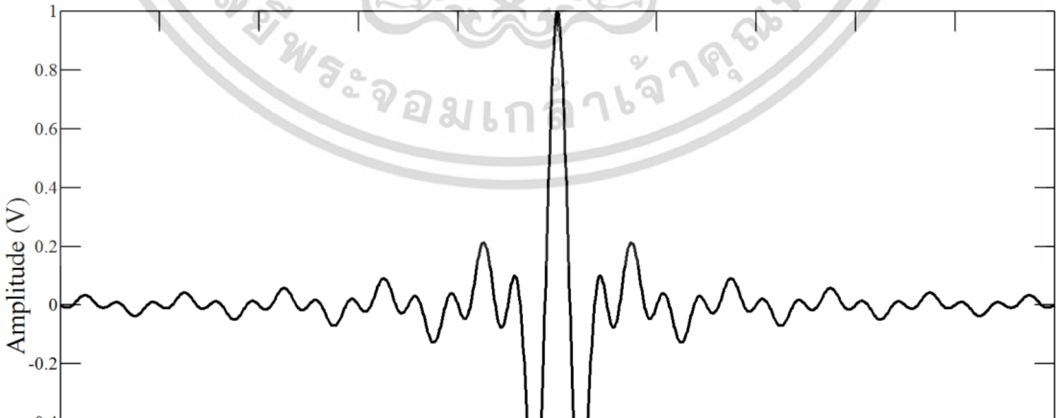
ในบทนี้ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับการสื่อสารแถบกว้าง โดยวิเคราะห์หาคุณสมบัติในแต่ละกรณีของการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบน และความแตกต่างเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับการสื่อสารแถบแคบ พร้อมยังได้ทำการศึกษาหาความเที่ยงตรงโดยทำการเปรียบเทียบกับผลการวัด

4.2 สัญญาณส่งรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

สัญญาณส่งแถบกว้างที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมดังที่นิยามในสมการ (3.1) และ (3.2) โดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 รูปที่ 4.1 ได้แสดงสัญญาณส่งรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลา จากรูปจะเห็นได้ว่าสัญญาณส่งจะมีแอมพลิจูดมากที่สุดเท่ากับ 1 V ที่เวลา 0 วินาที รูปที่ 4.2 แสดงความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่ง จากรูปจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่งมีค่าเป็น –102 dBm/MHz ที่ความถี่ –3 GHz ถึง –1 GHz และที่ความถี่ 1 GHz ถึง 3 GHz

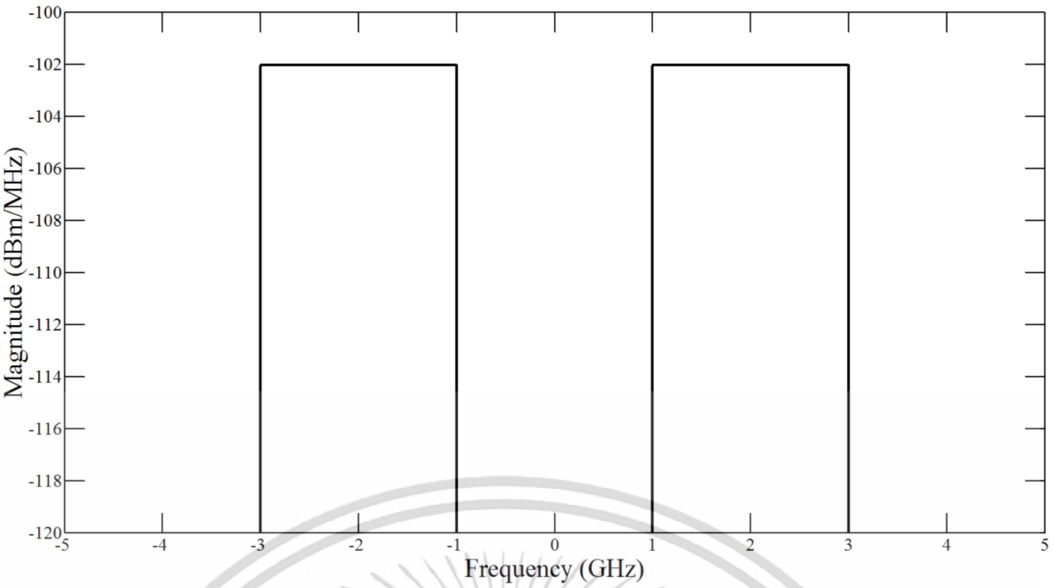
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของสัญญาณส่งรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

พารามิเตอร์	ค่า
แอมพลิจูดสูงสุด A	1 V
แบนด์วิดท์ f_b	2 GHz
ความถี่กลาง f_c	2 GHz
ความถี่ต่ำสุด f_L	1 GHz
ความถี่สูงสุด f_H	3 GHz



รูปที่ 4.1 สัญญาณส่งรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่งรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม

4.3 ช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแถบกว้าง

ช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแถบกว้างจะพิจารณาในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนดังที่ได้นิยามไว้ในสมการ (3.4) โดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแถบกว้าง

พารามิเตอร์	ค่า
ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับ d	3 m
ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งกับสิ่งกีดขวาง d_1	1.5 m
ระยะทางระหว่างสายอากาศรับรกับสิ่งกีดขวาง d_2	1.5 m
ความสูงของสิ่งกีดขวาง h	0 ถึง 2 m
ความสูงของสายอากาศส่ง h_t	1 m
ความสูงของสายอากาศรับ h_r	1 m

จากสมการ (3.7) และ (3.8) ใช้พารามิเตอร์ที่กำหนดในตารางที่ 4.2 สามารถคำนวณหาระยะทางของเส้นที่ลากจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ d' ได้ 3 m และความสูงของเส้นตรงที่ลากจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับที่ตำแหน่งสิ่งกีดขวาง h' ได้ 1 m

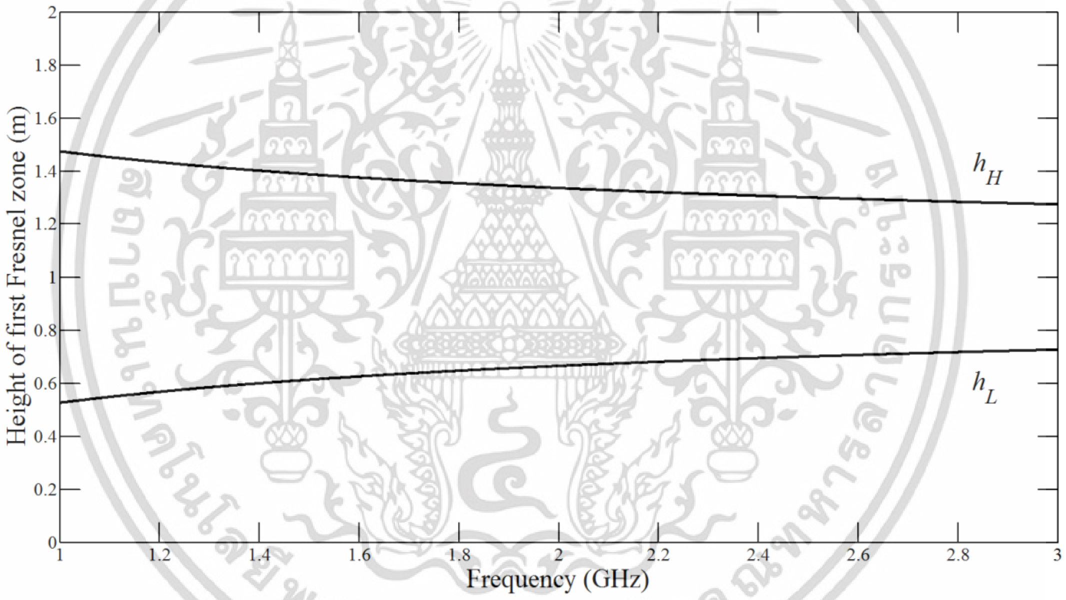
ในการวิเคราะห์หาความสูงของสิ่งกีดขวางที่เริ่มบดบังและบดบังอย่างสมบูรณ์ในเขตเฟรสเนลแรกที่ความถี่ต่าง ๆ ได้นิยามความสูงต่ำสุดของเขตเฟรสเนลแรก h_L และความสูงสูงสุดของเขตเฟรสเนลแรก h_H เป็น [รัศมีของเขตเฟรสเนลแรก r_1 นิยามไว้ในสมการ (3.6)]

$$h_L = h' - r_1 \quad (4.1)$$

$$h_H = h' + r_1 \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 แสดงความสูงของเขตเฟรสเนลแรกในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 GHz ถึง 3 GHz จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่ความถี่ต่ำจะมีเขตเฟรสเนลแรกกว้างกว่าที่ความถี่สูง โดยที่ความถี่ 1 GHz จะมีเขตเฟรสเนลแรกอยู่ที่ความสูงตั้งแต่ 0.53 m ถึง 1.47 m ส่วนที่ความถี่ 3 GHz จะมีเขตเฟรสเนลแรกอยู่ที่ความสูงตั้งแต่ 0.73 m ถึง 1.27 m ซึ่งจะทำให้เมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นเป็น 0.53 m จะเริ่มบดบังคลื่นที่ความถี่ 1 GHz และจะเริ่มบดบังคลื่นที่ความถี่สูงขึ้นเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น จนเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นเป็น 0.73 m สิ่งกีดขวางจะบดบังคลื่นครอบคลุมเต็มแถบความถี่ตั้งแต่ 1 GHz ถึง 3 GHz และเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นเป็น 1.27 สิ่งกีดขวางจะบดบังคลื่นที่ความถี่ 3 GHz อย่างสมบูรณ์ และจะบดบังคลื่นอย่างสมบูรณ์ที่ความถี่ต่ำลงเมื่อสิ่งกีดขวางมีความสูงเพิ่มขึ้น และเมื่อสิ่งกีดขวางมีความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 1.47 m สิ่งกีดขวางจะบดบังคลื่นอย่างสมบูรณ์ครอบคลุมเต็มแถบความถี่ตั้งแต่ 1 GHz ถึง 3 GHz ดังนั้น การกำหนดให้สิ่งกีดขวางมีความสูงตั้งแต่ 0 ถึง 2 m จึงทำให้สามารถวิเคราะห์การเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนแถบกว้างได้ครบทุกกรณี



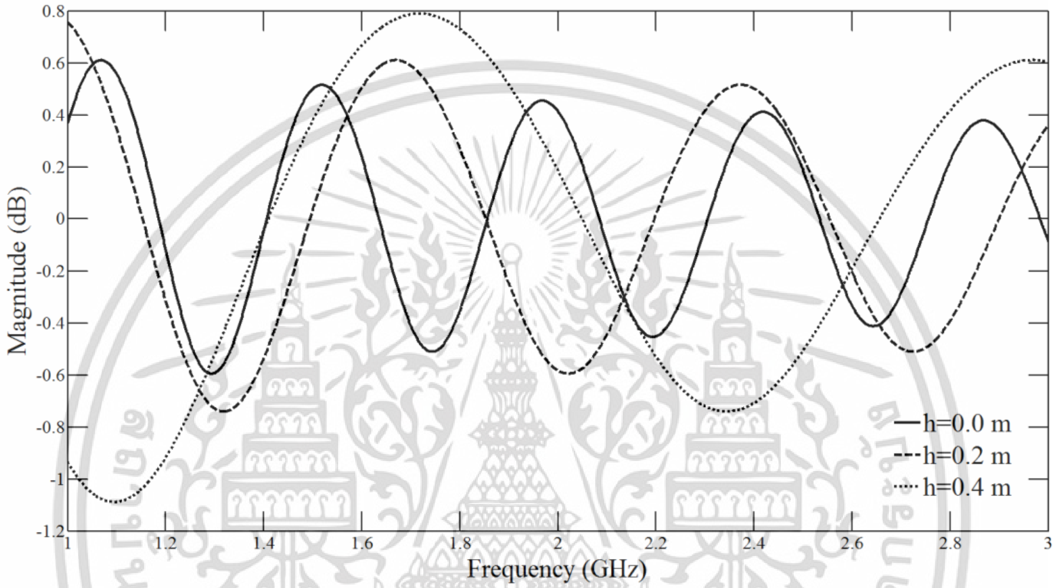
รูปที่ 4.3 ความสูงของเขตเฟรสเนลแรก

สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม จะแบ่งการพิจารณาเป็น 5 กรณี ตามกลุ่มความสูงของสิ่งกีดขวางที่มีคุณสมบัติปรากฏการณ์เกิดการเลี้ยวเบนแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.3 กรณีแรกเป็นกรณีที่สิ่งกีดขวางไม่ได้อยู่ในบริเวณของเขตเฟรสเนลแรก กรณีที่ 2 เป็นกรณีที่สิ่งกีดขวางได้บดบังเขตเฟรสเนลแรกบางส่วนครอบคลุมเต็มความถี่ตั้งแต่ 1 GHz ถึง 3 GHz แต่อยู่ใต้ระดับ LOS กรณีที่ 3 เป็นกรณีที่สิ่งกีดขวางอยู่ที่ระดับ LOS กรณีที่ 4 เป็นกรณีที่สิ่งกีดขวางได้บดบังเขตเฟรสเนลแรกบางส่วนครอบคลุมเต็มความถี่ตั้งแต่ 1 GHz ถึง 3 GHz และอยู่เหนือระดับ LOS กรณีที่ 5 ซึ่งเป็นกรณีสุดท้าย เป็นกรณีที่สิ่งกีดขวางได้บดบังเขตเฟรสเนลแรกอย่างสมบูรณ์ครอบคลุมเต็มความถี่ตั้งแต่ 1 GHz ถึง 3 GHz

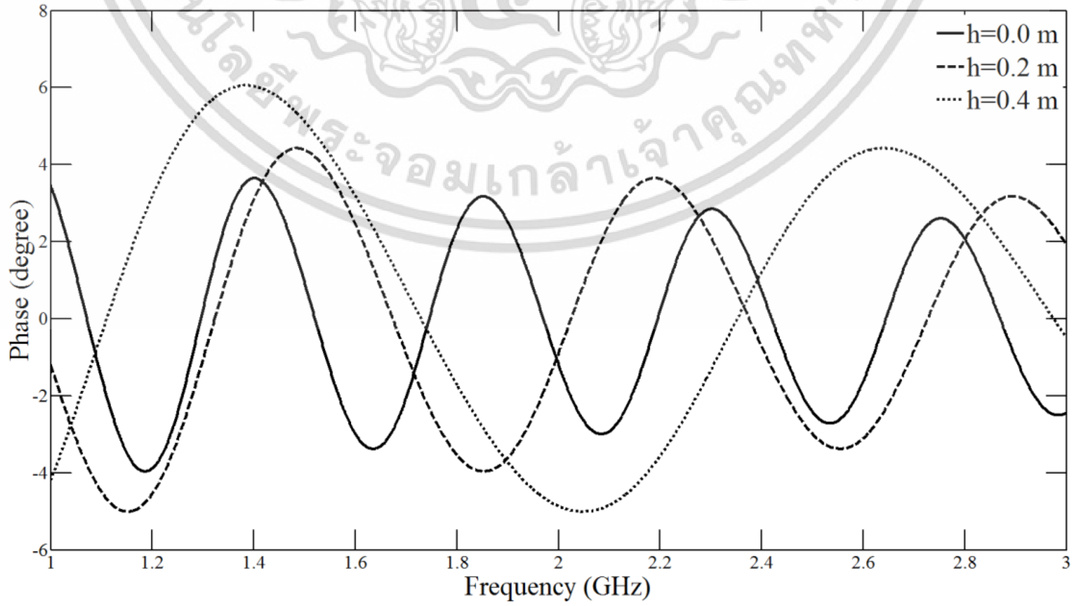
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การแบ่งกรณีการวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่

กรณีที่	ความสูงของสิ่งกีดขวาง h (m)
1	0, 0.2, 0.4
2	0.8, 0.9
3	1.0
4	1.1, 1.2
5	1.6, 1.8, 2.0



รูปที่ 4.4 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 1



รูปที่ 4.5 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 1 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าทั้งขนาดและเฟสจะมีการแกว่งขึ้นลงเนื่องจากการแทรกสอดระหว่างแหล่งกำเนิดแบบจุดบนหน้าคลื่นด้านบนของสิ่งกีดขวางตามหลักการของฮอยเกนส์-เฟรสเนล และถือว่าเป็นช่องสัญญาณ LOS โดยมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับ 0 เมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นความถี่ของการแกว่งจะลดลง แต่ระดับของการแกว่งขึ้นลงจะเพิ่มขึ้น พารามิเตอร์ทางสถิติของขนาดและเฟสซึ่งได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ทางสถิติของขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่

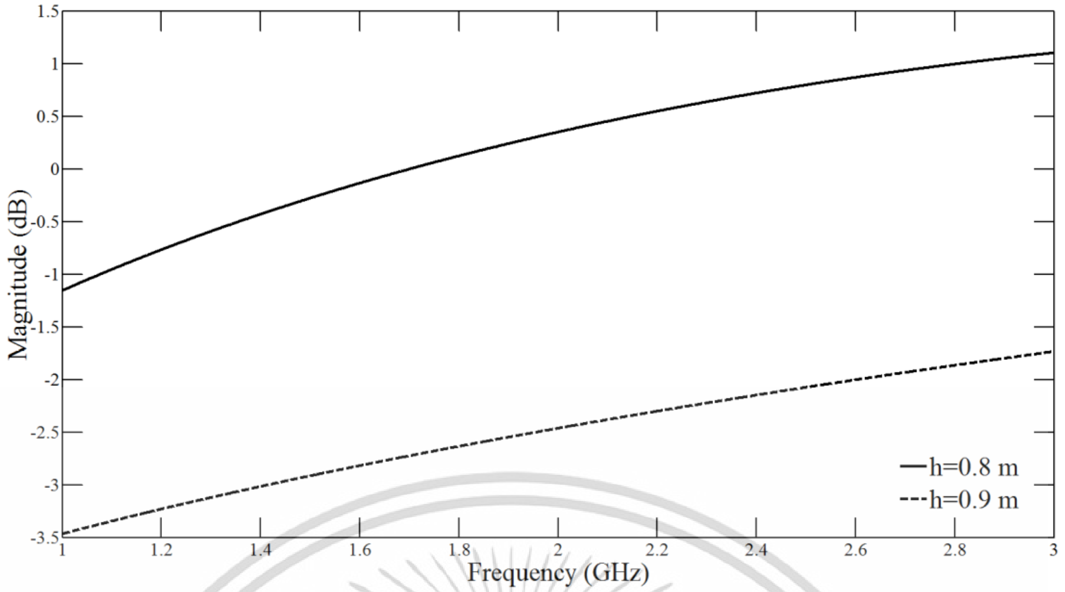
ความสูงของสิ่งกีดขวาง h (m)	พารามิเตอร์ (dB)			
	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.0	0.03	0.61	–0.60	0.35
0.2	–0.02	0.76	–0.74	0.42
0.4	–0.06	0.79	–1.09	0.60

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ทางสถิติของเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่

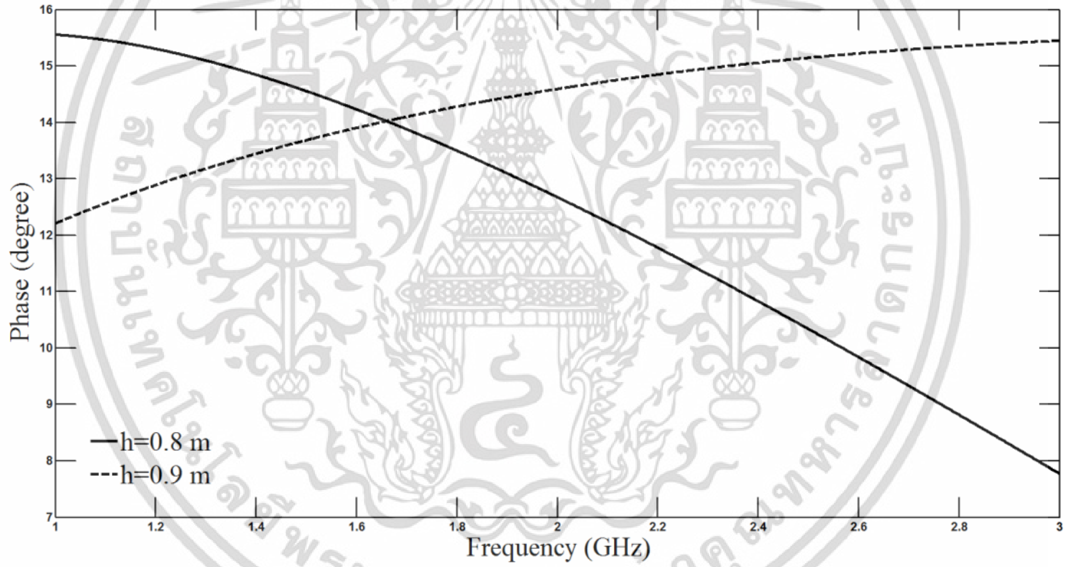
ความสูงของสิ่งกีดขวาง h (m)	พารามิเตอร์ (°)			
	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.0	–0.10	3.65	–3.96	2.23
0.2	–0.15	4.42	–5.01	2.88
0.4	0.95	6.05	–5.01	3.47

รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 แสดงขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 2 ตามลำดับ เนื่องจากในกรณีนี้ สิ่งกีดขวางเริ่มอยู่ในเขตเฟรสเนลแรก ดังนั้น ตั้งแต่กรณีนี้เป็นต้นไป จึงถือว่าเป็นช่องสัญญาณ NLOS ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่จะไม่มีลักษณะแกว่งไปตามความถี่ และในกรณีนี้ สิ่งกีดขวางอยู่ในเขตเฟรสเนลแรกของความถี่ต่ำมีสัดส่วนมากกว่าที่ความถี่สูง ดังนั้น สิ่งกีดขวางจะบดบังคลื่นที่ความถี่ต่ำมากกว่าที่ความถี่สูง ทำให้ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และส่วนใหญ่มีค่าติดลบเนื่องจากถูกลดทอนจากการบดบังของสิ่งกีดขวาง เมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น คลื่นจะถูกบดบังมากขึ้น ทำให้ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่จะลดลง ซึ่งค่าเฉลี่ยของขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่จะลดลงจาก 0.23 dB เป็น –2.51 dB เมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นจาก 0.8 m เป็น 0.9 m ส่วนเฟสในกรณีนี้จะมีลักษณะเกือบจะเป็นเส้นตรงไปตามความถี่ มีความโค้งเล็กน้อย โดยที่ขนาดของความชันของเฟสจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 2



รูปที่ 4.7 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 2

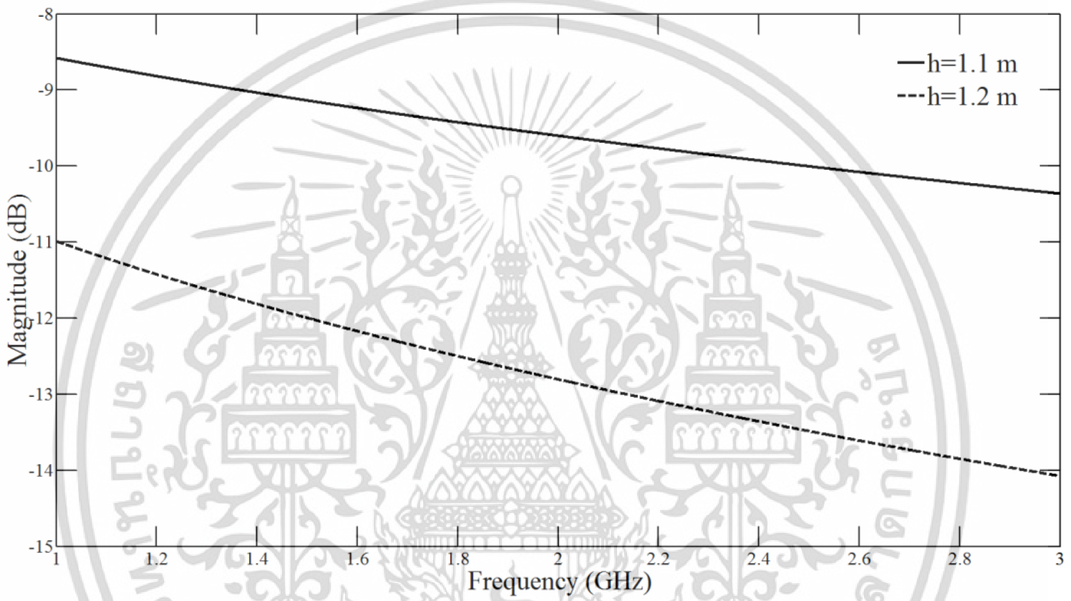
สำหรับในกรณีที่ 3 ความสูงของสิ่งกีดขวางเป็น 1 m ซึ่งอยู่ในระดับ LOS หรือ $h = h'$ จากสมการ (3.5) จะทำให้ได้พารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรสเนล-เคอร์ชอฟฟ์ $\nu(f) = 0$ เมื่อแทนลงไปในสมการฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนแถบกว้างที่แสดงในสมการ (3.4) จะได้

$$H_d(f) = \frac{1+j}{2}\int_0^{\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}x^2}dx = 0.5 \qquad (4.1)$$

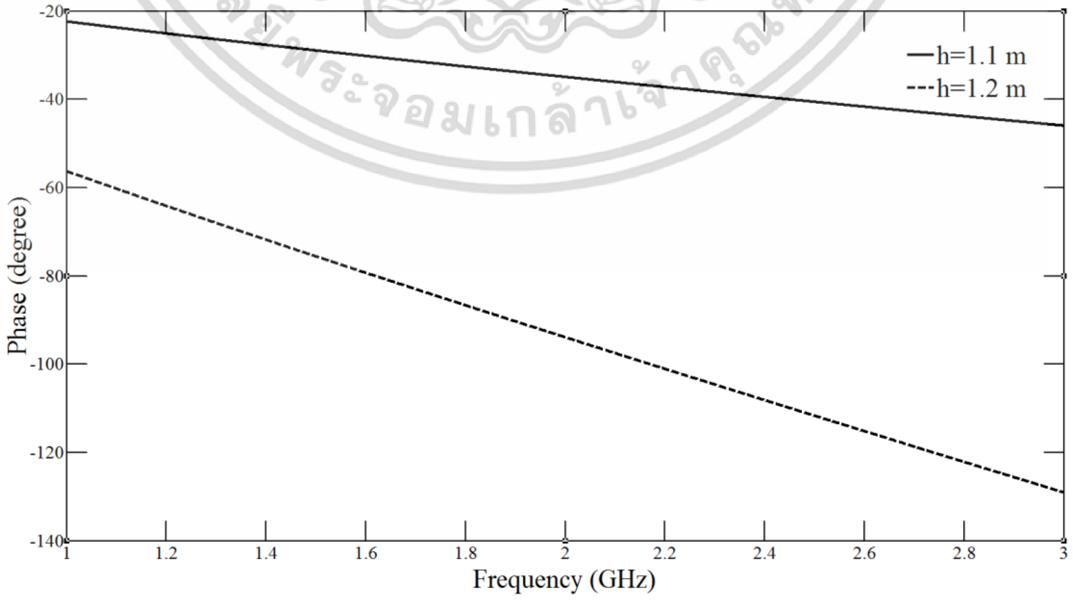
ดังนั้น จึงทำให้ในกรณีนี้ขนาดจะมีค่าคงที่ตามความถี่ คือมีค่าเป็น $20\log(0.5) = -6.02$ dB และเฟสคงที่เท่ากับ 0° ที่ทุกความถี่

เอกสารนี้... ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 4 ตามลำดับ กรณีนี้ สิ่งกีดขวางได้อยู่ในเขตเฟรสเนลแรกของความถี่ต่ำมีสัดส่วนน้อยกว่าที่ความถี่สูง ทำให้ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่มีค่าลงลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และจะมีค่าติดลบมากกว่าในกรณีที่ 3 คือมากกว่า –6.02 dB เมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่จะลดลง ซึ่งค่าเฉลี่ยของขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่จะลดลงจาก –9.56 dB เป็น –12.72 dB เมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นจาก 1.1 m เป็น 1.2 m ส่วนเฟสในกรณีนี้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตามความถี่มากกว่าในกรณีที่ 2 โดยที่ขนาดและความชันของเฟสจะมีแนวโน้มติดลบเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น



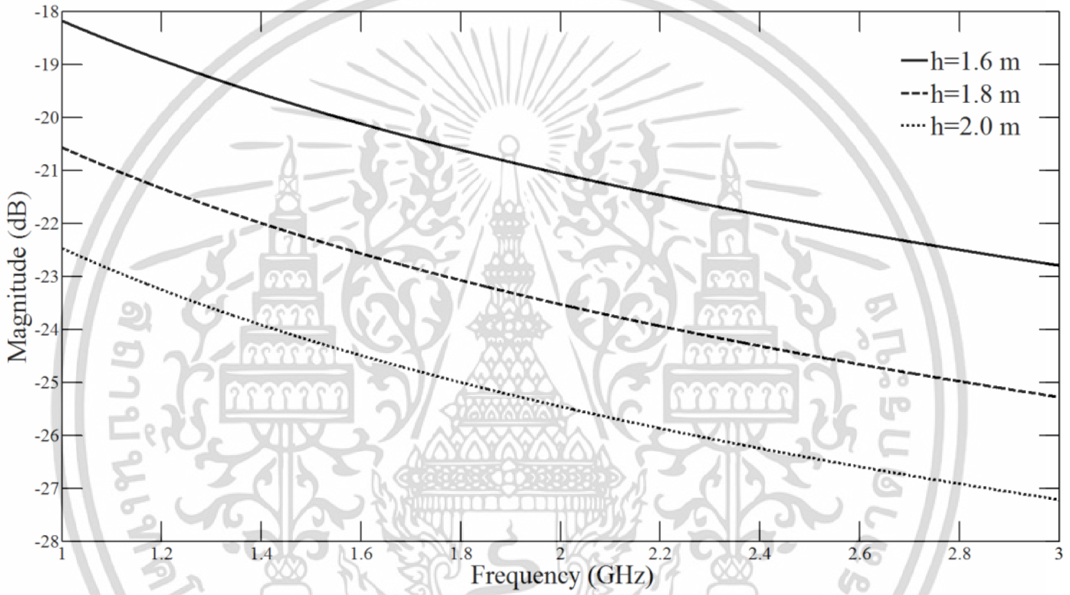
รูปที่ 4.8 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 4



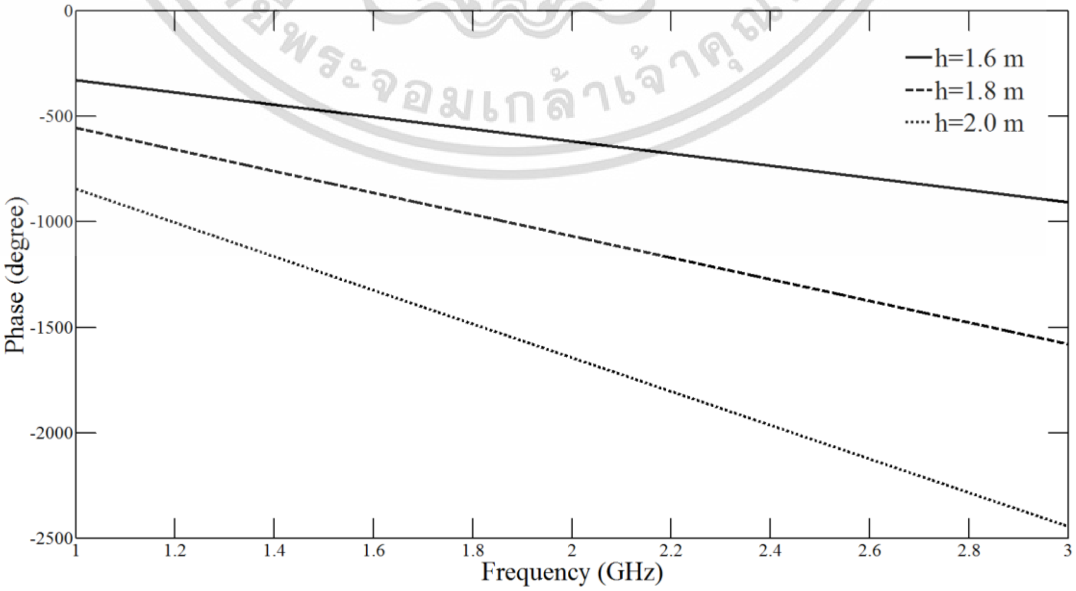
รูปที่ 4.9 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 แสดงขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 5 ตามลำดับ ในกรณีนี้ สิ่งกีดขวางได้บดบังเขตเฟรสเนลแรกอย่างสมบูรณ์ครอบคลุมแถบความถี่ตั้งแต่ 1 GHz ถึง 3 GHz และมีสัดส่วนบัดบังเขตเฟรสเนลอันดับที่สูงกว่าของความถี่ต่ำมีสัดส่วนน้อยกว่าที่ความถี่สูง ทำให้ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่มีค่าลงลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และจะเป็นกรณีที่มีค่าติดลบมากที่สุด เมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่จะลดลง ซึ่งค่าเฉลี่ยของขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่จะลดลง คือมีค่าเป็น –20.88 dB, –23.34 dB และ –25.26 dB ที่ความสูงของสิ่งกีดขวางเป็น 1.6 m, 1.8 m และ 2.0 m ตามลำดับ ส่วนเฟสในกรณีนี้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตามความถี่มากที่สุด โดยที่ขนาดและความชันของเฟสจะมีแนวโน้มติดลบเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นเหมือนกับในกรณีที่ 4



รูปที่ 4.10 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 5

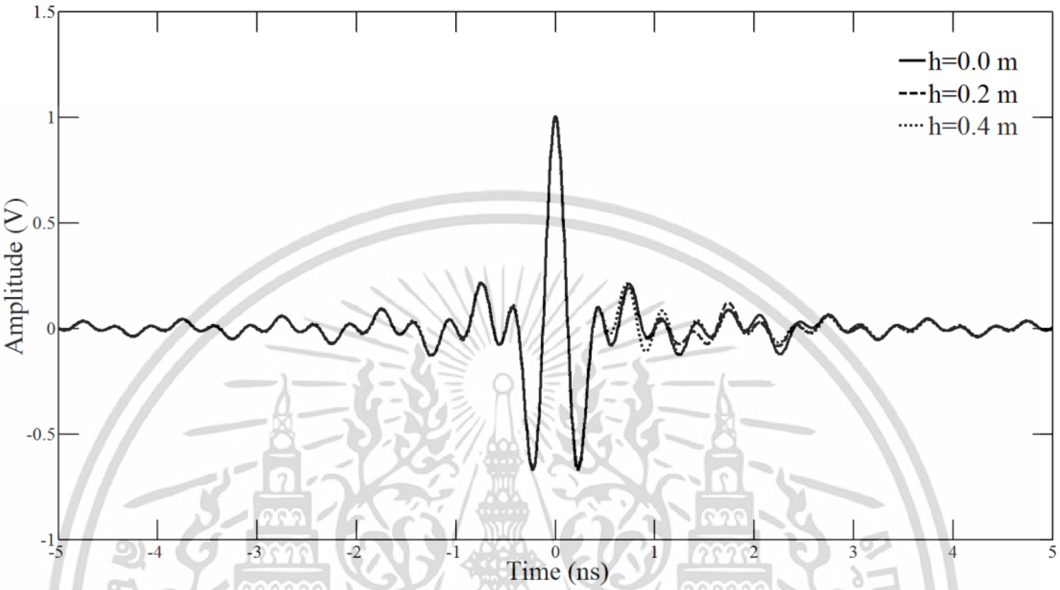


รูปที่ 4.11 เฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ในกรณีที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

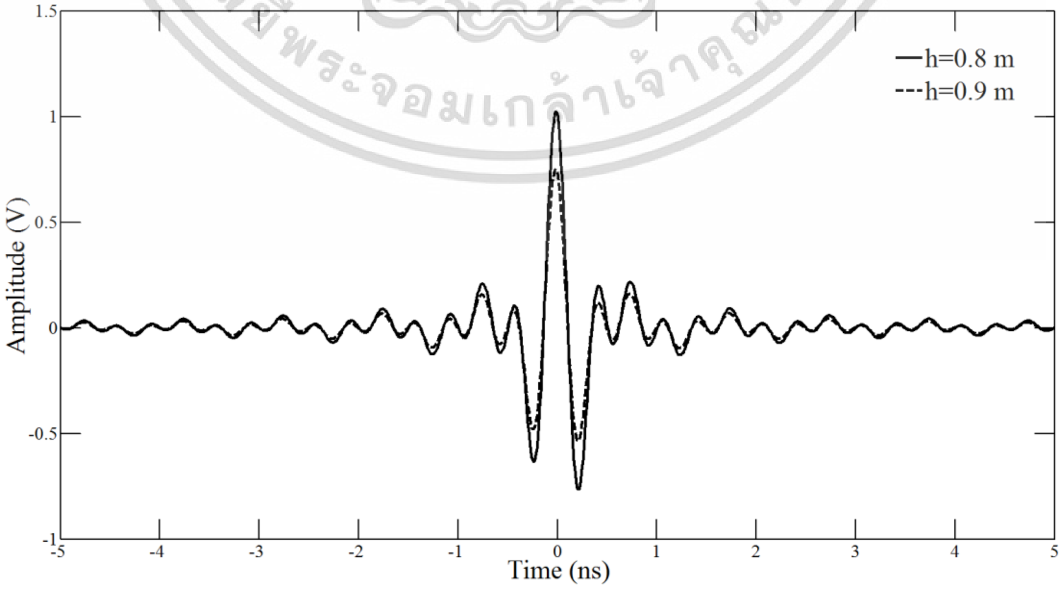
4.4 สัญญาณการเลี้ยวเบนแถบกว้าง

รูปที่ 4.12 แสดงสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมในกรณีที่ 1 ในกรณีนี้ จะเห็นได้ว่าความสูงของสิ่งกีดขวางมีผลกระทบต่อสัญญาณที่รับได้น้อยมาก สัญญาณมีรูปร่างเหมือนกับสัญญาณส่ง โดยจะเกิดความเพี้ยนเล็กน้อยที่เวลาประมาณ 0.5 ns ถึง 2.5 ns สัญญาณมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 1 V ที่เวลา 0 s เหมือนกับสัญญาณส่ง



รูปที่ 4.12 สัญญาณที่รับได้ในกรณีที่ 1

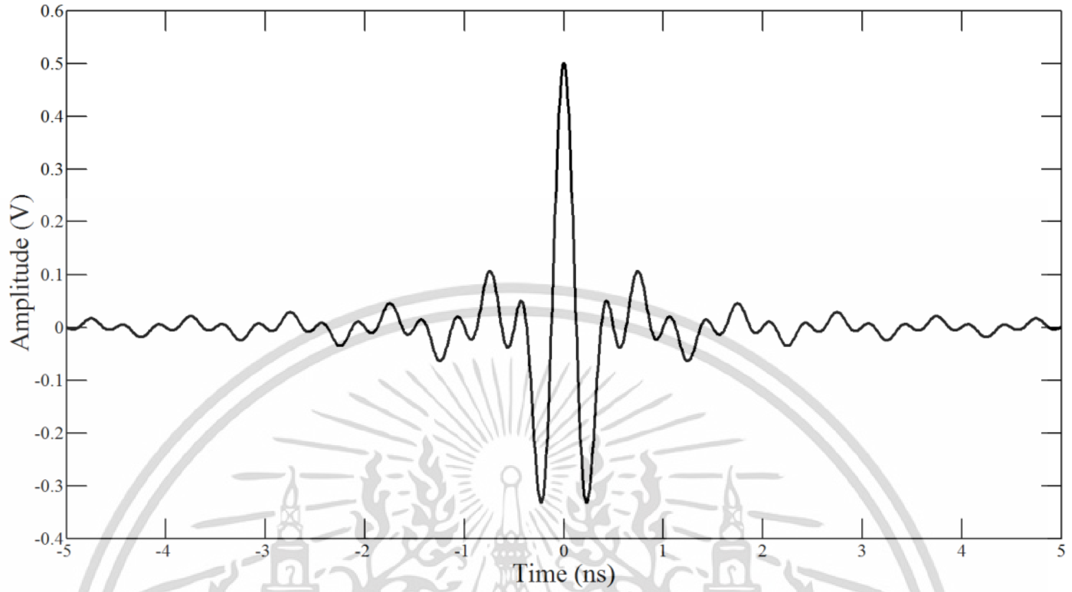
รูปที่ 4.13 แสดงสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมในกรณีที่ 2 ในกรณีนี้ จะเห็นได้ว่าความสูงของสิ่งกีดขวางเริ่มมีผลกระทบต่อสัญญาณที่รับได้ โดยเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณจะลดลง คือลดลงจาก 1.0 V เป็น 0.7 V เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นจาก 0.8 m เป็น 0.9 m แอมพลิจูดสูงสุดยังอยู่ที่เวลา 0 s เหมือนกับกรณีที่ 1



รูปที่ 4.13 สัญญาณที่รับได้ในกรณีที่ 2

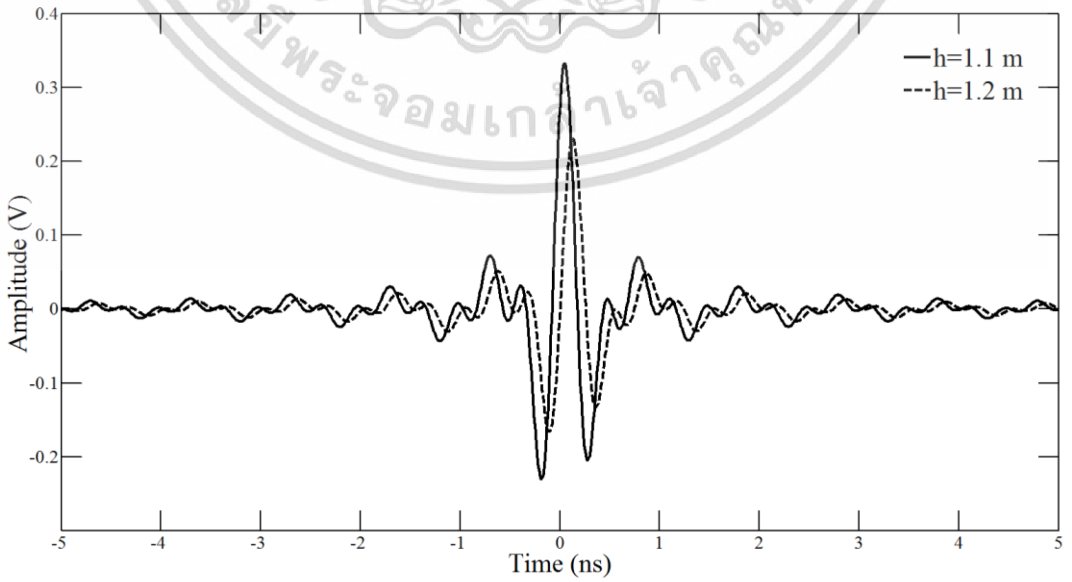
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 แสดงสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมในกรณีที่ 3 ในกรณีนี้ สัญญาณที่รับได้จะมีรูปร่างเหมือนกับสัญญาณส่ง แต่แอมพลิจูดสูงสุดจะลดลงเป็น 0.5 V แอมพลิจูดสูงสุดยังคงอยู่ที่เวลา 0 s เหมือนกับกรณีที่ 1 และ 2



รูปที่ 4.14 สัญญาณที่รับได้ในกรณีที่ 3

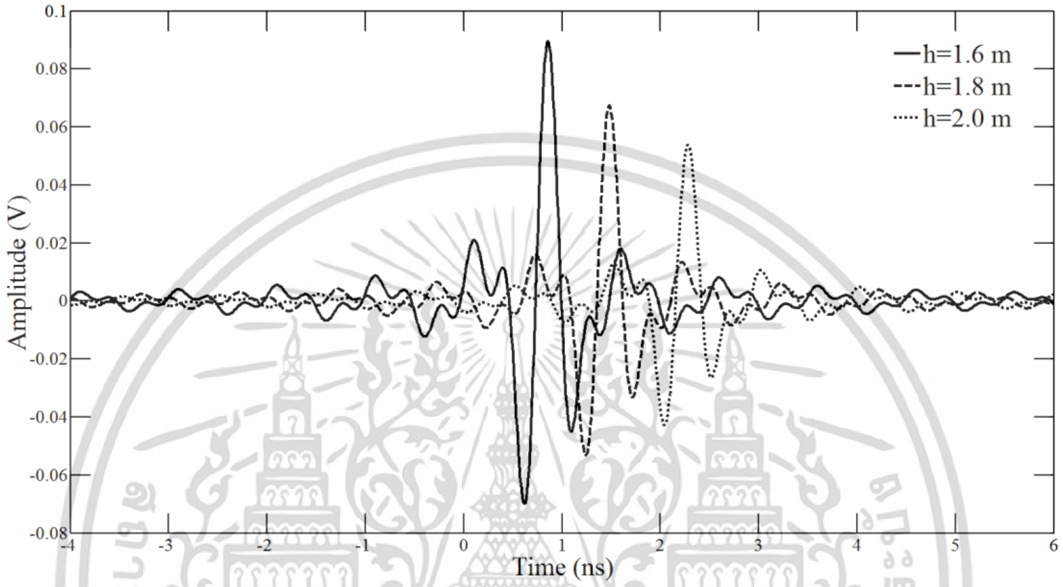
รูปที่ 4.15 แสดงสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมในกรณีที่ 4 ในกรณีนี้ แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณจะลดลงเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น คือ ลดลงจาก 0.33 V เป็น 0.23 V เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นจาก 1.1 m เป็น 1.2 m นอกจากนั้นยังเริ่มมีการประวิงเวลาของสัญญาณเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น โดยที่เวลาที่มีแอมพลิจูดสูงสุดเพิ่มจาก 0.05 ns เป็น 0.13 ns เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นจาก 1.1 m เป็น 1.2 m



รูปที่ 4.15 สัญญาณที่รับได้ในกรณีที่ 4

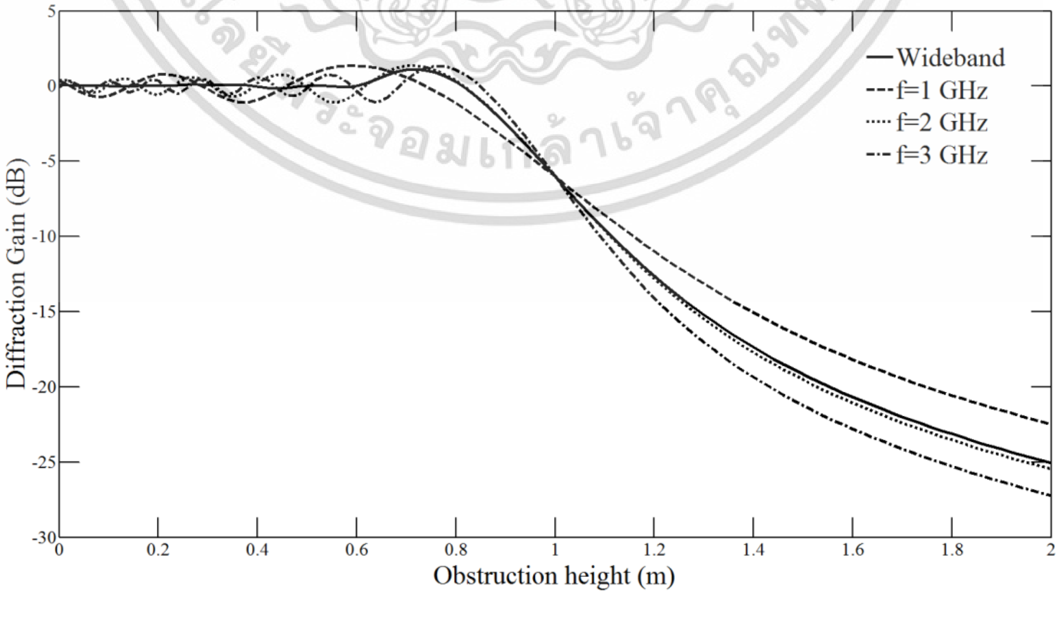
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.16 แสดงสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมในกรณีที่ 5 ในกรณีนี้ คุณสมบัติของสัญญาณที่รับได้จะเหมือนกับกรณีที่ 4 คือ แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณจะลดลงเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น 0.09 V, 0.07 V และ 0.05 V ที่ความสูงของสิ่งกีดขวางเป็น 1.6 m, 1.8 m และ 2.0 m ตามลำดับ การประวิงเวลาของสัญญาณเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น โดยที่เวลาที่มีแอมพลิจูดสูงสุดมีค่าเป็น 0.86 ns, 1.48 ns และ 2.28 ns เมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางเป็น 1.6 m, 1.8 m และ 2.0 m ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 สัญญาณที่รับได้ในกรณีที่ 5

4.5 อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้าง



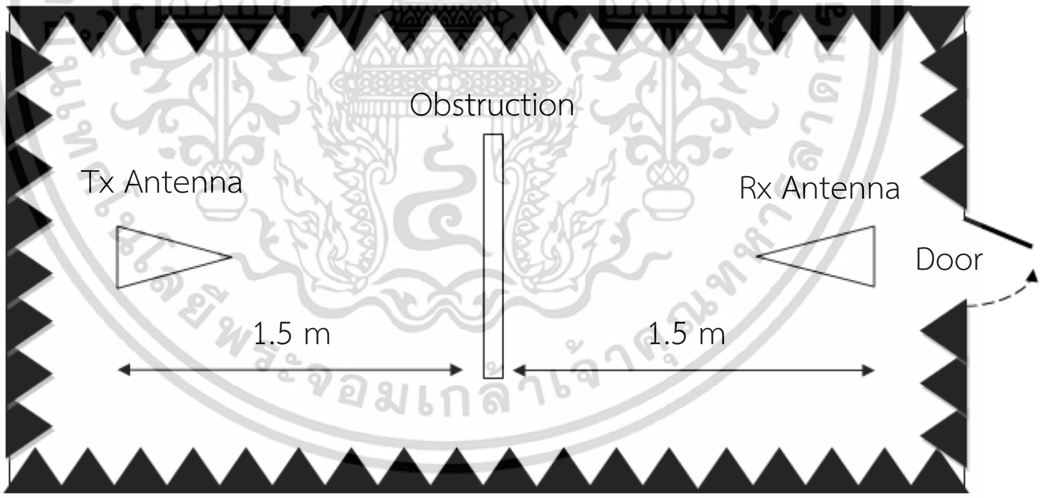
รูปที่ 4.17 อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างเทียบกับแถบแคบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.17 แสดงอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างเทียบกับแถบแคบที่ความถี่ 1 GHz, 2 GHz และ 3 GHz ซึ่งเป็นความถี่ต่ำสุด ความถี่กลาง และความถี่สูงสุดของแถบกว้าง จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่บริเวณในกรณีที่ 1 อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างจะมีค่าประมาณคงที่เป็น 0 dB ส่วนแถบแคบจะมีการแกว่งขึ้นลง ส่วนในบริเวณกรณีที่ 2 ถึง 5 อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบแคบที่ความถี่ 2 GHz มากที่สุด ซึ่งเป็นความถี่กลางของแถบกว้าง

4.6 การเปรียบเทียบกับผลการวัด

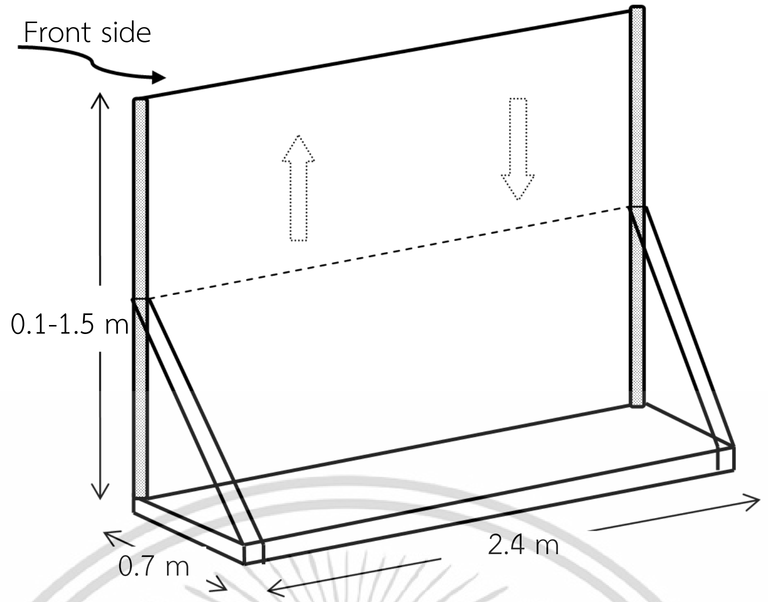
ในการวัดช่องสัญญาณที่มีสิ่งกีดขวาง ได้ทำการวัดในห้องไร้การสะท้อนที่ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยห้องไร้การสะท้อนมีขนาดกว้าง 3.5 m ยาว 6 m และสูง 2.95 m ใช้เครื่อง VNA วัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณเชิงซ้อนในเทอมของ S_{21} ที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 GH ถึง 3 GHz กำหนดจำนวนจุดความถี่เป็น 1601 จุด โดยที่สายอากาศส่งต่อเข้ากับพอร์ต 1 และสายอากาศรับต่อเข้ากับพอร์ต 2 ของ VNA แบบจำลองการวัดจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหมือนกับพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม นั่นคือ ความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็น 1 m ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับเป็น 3 m โดยมีสิ่งกีดขวางเป็นแผ่นอะลูมิเนียมอยู่ตรงกลาง แบบจำลองการวัดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แบบจำลองการวัด

สิ่งกีดขวางแผ่นอะลูมิเนียมถูกออกแบบให้สามารถปรับระดับความสูงได้ตั้งแต่ 0.1 m ถึง 1.5 m หรือ 0.3 λ_L ถึง 5.0 λ_L และ 1 λ_H ถึง 15 λ_H เมื่อ λ_L และ λ_H เป็นความยาวคลื่นที่ความถี่ต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับ โดยปรับระดับความสูงได้ระดับละ 0.1 m (0.3 λ_L, 1 λ_H) แผ่นอะลูมิเนียมหนา 2 mm (0.007 λ_L, 0.02 λ_H) และมีความกว้างเป็น 2.4 m (8 λ_L, 24 λ_H) ซึ่งเป็นความกว้างที่เหมาะสมสามารถนำเข้าไปติดตั้งในห้องไร้การสะท้อนได้สะดวก รูปเรขาคณิตของสิ่งกีดขวางแผ่นอะลูมิเนียมได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 รูปเรขาคณิตของสิ่งกีดขวางแผ่นอะลูมิเนียม

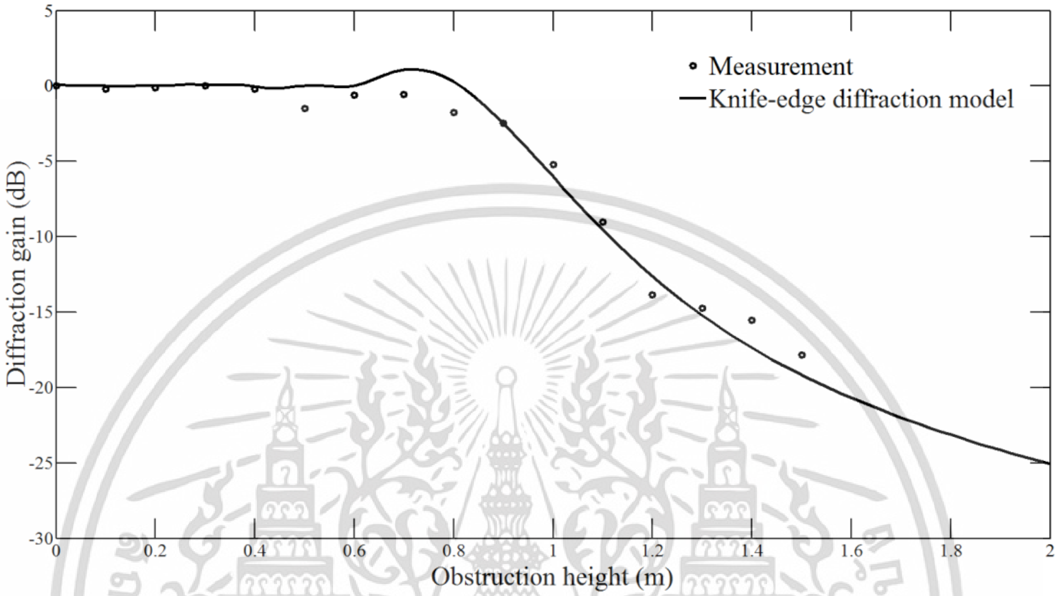
สำหรับสายอากาศ ได้ใช้สายอากาศทรงกรวยบิดเกลียวรูปก้นหอย รุ่น 3102 ของบริษัท ETS-Lindgren เป็นทั้งสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ซึ่งมีรูปแบบการแพร่กระจายแบบมีทิศทาง มีอัตราขยายประมาณ 3 dB และมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมแบบหมุนซ้าย รูปของสายอากาศทรงกรวยบิดเกลียวรูปก้นหอยที่ใช้ในการวัดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.20 (คู่มือการใช้สายอากาศอยู่ในภาคผนวก ก) สาเหตุที่เลือกใช้สายอากาศชนิดนี้ เนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีอยู่แล้ว ซึ่งมีอัตราขยายสูงสุดในช่วงความถี่ที่ทำการวัด

รูปที่ 4.20 สายอากาศทรงกรวยบิดเกลียวรูปก้นห้อย

ในการคำนวณหาฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนของช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม จะต้องทำการวัดช่องสัญญาณที่มีสิ่งกีดขวาง และช่องสัญญาณที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง แล้วนำฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนของช่องสัญญาณที่มีสิ่งกีดขวางหารด้วยฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนของช่องสัญญาณที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง ซึ่งจะทำให้ตัดผลกระทบของคุณสมบัติของสายอากาศส่ง การสูญเสียเชิงวิถี และคุณสมบัติของสายอากาศรับออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.21 แสดงอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างที่ได้จากแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมเปรียบเทียบกับผลการวัด จากรูปจะเห็นได้ว่าอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างที่ได้จากแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการวัด โดยจะมีค่าผิดพลาดอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.04 dB ถึง 2.03 dB มีค่าผิดพลาดรากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square: RMS) เท่ากับ 1.04 dB



รูปที่ 4.21 อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างเทียบกับผลการวัด

4.7 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงในบทนี้ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับการสื่อสารแถบกว้าง โดยเริ่มจากการกำหนดสัญญาณส่งรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม วิเคราะห์ช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแถบกว้าง คำนวณหาสัญญาณที่วัดได้เปรียบเทียบอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างกับแถบแคบ และศึกษาความเที่ยงตรงโดยเปรียบเทียบกับผลการวัด ในบทต่อไปจะสรุปผลการวิจัยทั้งหมด พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนางานวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาเชิงทดลองของการเลี้ยวเบนแถบกว้าง โดยได้ใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 3 GHz เป็นสัญญาณส่งแถบกว้าง ได้ทำการขยายแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมให้อยู่ในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อน โดยกำหนดให้ช่องสัญญาณขอบเหลี่ยมคมมีระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็น 3 m สายอากาศส่งและสายอากาศรับสูง 1 m มีสิ่งกีดขวางอยู่ตรงกลาง สิ่งกีดขวางมีความสูงตั้งแต่ 0 ถึง 2 m หลังจากนั้นคำนวณหารูปคลื่นสัญญาณที่รับได้ ได้นิยามอัตราการเลี้ยวเบนแถบกว้างให้อยู่บนพื้นฐานกำลังเฉลี่ย ได้ศึกษาความเที่ยงตรงของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแถบกว้างนี้โดยเปรียบเทียบกับผลของการวัด ซึ่งได้วัดช่องสัญญาณในห้องไร้การสะท้อน ใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นสิ่งกีดกวาง ใช้สายอากาศทรงกรวยบิดเกลียวรูปก้นหอยเป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับ และใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer: VNA) วัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณเชิงซ้อน

ในการวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแถบกว้าง และสัญญาณการเลี้ยวเบนที่รับได้ ได้แบ่งการวิเคราะห์เป็น 5 กรณี กรณีแรกคือสิ่งกีดขวางไม่ได้อยู่ในเขตเฟรสเนลแรก กรณีที่ 2 สิ่งกีดขวางอยู่ในเขตเฟรสเนลแรกแต่อยู่ต่ำกว่าระดับ LOS กรณีที่ 3 สิ่งกีดขวางอยู่ที่ระดับ LOS กรณีที่ 4 สิ่งกีดขวางอยู่ในเขตเฟรสเนลแรกและอยู่สูงกว่าระดับ LOS และกรณีที่ 5 สิ่งกีดขวางบดบังเขตเฟรสเนลแรกอย่างสมบูรณ์

คุณสมบัติของขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแถบกว้างได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ ส่วนคุณสมบัติของแอมพลิจูดสูงสุดและเวลาการประวิงของสัญญาณการเลี้ยวเบนที่รับได้ได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ

กรณีที่	คุณสมบัติ
1	แกว่งขึ้นลงตามความถี่ ระดับเพิ่มขึ้นและความถี่การแกว่งลดลงตามขวางสูงของสิ่งกีดขวาง
2	เพิ่มขึ้นตามความถี่ ลดลงตามความสูงของสิ่งกีดขวาง
3	คงที่เท่ากับ –6.02 dB
4	ลงลงตามความถี่ ลดลงตามความสูงของสิ่งกีดขวาง
5	ลงลงตามความถี่ ลดลงตามความสูงของสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ

กรณีที่	คุณสมบัติ
1	แกว่งขึ้นลงตามความถี่ ระดับเพิ่มขึ้นและความถี่การแกว่งลดลงตามความสูงของสิ่งกีดขวาง
2	เกือบเป็นเส้นตรงตามความถี่ ขนาดความชันลดลงตามความสูงของสิ่งกีดขวาง
3	คงที่เท่ากับ 0°
4	เป็นเส้นตรงมากขึ้น ความชันติดลบมากขึ้นตามความสูงของสิ่งกีดขวาง
5	เป็นเส้นตรงมากสุด ความชันติดลบมากขึ้นตามความสูงของสิ่งกีดขวาง

ตารางที่ 5.3 คุณสมบัติของแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณการเลี้ยวเบนที่รับได้

กรณีที่	คุณสมบัติ
1	เท่ากับสัญญาณส่ง
2	ลดลงตามความสูงของสิ่งกีดขวาง
3	ลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของสัญญาณส่ง
4	ลดลงตามความสูงของสิ่งกีดขวาง
5	ลดลงตามความสูงของสิ่งกีดขวาง

ตารางที่ 5.4 คุณสมบัติของเวลาการประวิงของสัญญาณการเลี้ยวเบนที่รับได้

กรณีที่	คุณสมบัติ
1	เท่ากับ 0 s
2	เท่ากับ 0 s
3	เท่ากับ 0 s
4	เพิ่มขึ้นตามความสูงของสิ่งกีดขวาง
5	เพิ่มขึ้นตามความสูงของสิ่งกีดขวาง

สำหรับการเปรียบเทียบอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างกับแถบแคบ ที่บริเวณในกรณีที่ 1 อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างจะมีค่าประมาณคงที่เป็น 0 dB ส่วนแถบแคบจะมีการแกว่งขึ้นลง ส่วนในบริเวณกรณีที่ 2 ถึง 5 อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบแคบที่ความถี่กลางของแถบกว้าง

ในการศึกษาความเที่ยงตรงของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแถบกว้าง ได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการวัด จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างที่ได้จากแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการวัด โดยจะมีค่าผิดพลาดอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.04 dB ถึง 2.03 dB มีค่าผิดพลาด RMS เท่ากับ 1.04 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนางานวิจัย

สายอากาศที่ใช้วัดในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้สายอากาศทรงกรวยบิดเกลียวรูปก้นหอย ซึ่งมีการโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนซ้าย ดังนั้น ควรจะทำการศึกษาอัตราขยายการเลี้ยวเบนโดยใช้สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์ชนิดอื่น เพื่อที่จะได้ศึกษาผลกระทบของการโพลาไรซ์ที่มีต่ออัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้าง

แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแถบกว้างในวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง เพราะได้พิจารณาในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อน ทำให้พิจารณาสัญญาณที่ความถี่กว้างตามที่ต้องการได้ นอกจากนั้น สามารถนำไปใช้ร่วมกับสูตรของฟรีส [13] แบบจำลองช่องสัญญาณการสะท้อนพื้น [14] และแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถี ที่ได้พัฒนามาอยู่ในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนสำหรับการสื่อสาร UWB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] J. Karaoguz, "High-rate wireless personal area networks," **IEEE Communications Magazine**, vol. 39, no. 12, pp. 96-102, 2001.

[2] H. Shinde and M. Borse, "High-rate wireless personal area network," **IEEE International Conference on Personal Wireless Communications (ICPWC)**, pp. 19-23, 2005.

[3] B. Rose, "Hone networks: a standards perspective," **IEEE Communications Magazine**, vol. 39, no. 12, pp. 78-85, 2001.

[4] H. D. Hristov, **Fresnel zones in wireless link, zone plate lenses and antennas**, Artech House, 2000.

[5] P. Supanakoon, K. Wansiang, S. Promwong and J. Takada, "Simple waveform for UWB communication," **The 2005 ECTI Conference (ECTI-CON)**, pp. 626-629, 12-13 May 2005.

[6] M. P. M. Hall, L. W. Barclay and M. T. Hewitt, **Propagation of radiowaves**, The Institute of Electrical Engineers, 1996.

[7] J. D. Parson, **The mobile radio propagation channel**, 2nd edition, John Wiley & Sons Ltd, 2000.

[8] E. C. Jordan and K. G. Balmain, **Electromagnetic waves & radiating systems**, 2nd edition, Prentice-Hall, 1980.

[9] P. Supanakoon and S. Promwong, "Study on knife-edge diffraction model of ultra wideband impulse radio signal," **International Conference on Digital Broadcasting (ICDB)**, PID015, July 2013.

[10] อรรถวุฒิ วานิช, พิชญ สุพรรณกูล และ สถาพร พรหมวงศ์, "การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับสัญญาณแถบกว้าง," **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (EENET) ครั้งที่ 8**, หน้า 337-380, 25-27 พฤษภาคม 2559

[11] J. Griffiths, **Radio wave propagation and antenna: an introduction**, Prentice-Hall International, 1987.

[12] R. Levien, "The Euler spiral: a mathematical history," **Technical Report No. UCB/EECS-2008-111**, Electrical Engineering and Computer Sciences University of California at Berkeley, pp. 1-14, 2 Sept. 2008.

[13] J. Takada, S. Promwong and W. Hachitani, "Extension of Friis' transmission formula for UWB systems," **Technical Report of IEICE**, WBS2003-8/MW2003-20, May 2003.

[14] P. Supanakoon, S. Kaewsirisin, S. Promwong, S. Noppanakeepong and J. Takada, "Ground reflection path loss based on average power loss for ultra wideband communications," **Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)**, vol. 4, pp. 2413-2416, Dec. 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

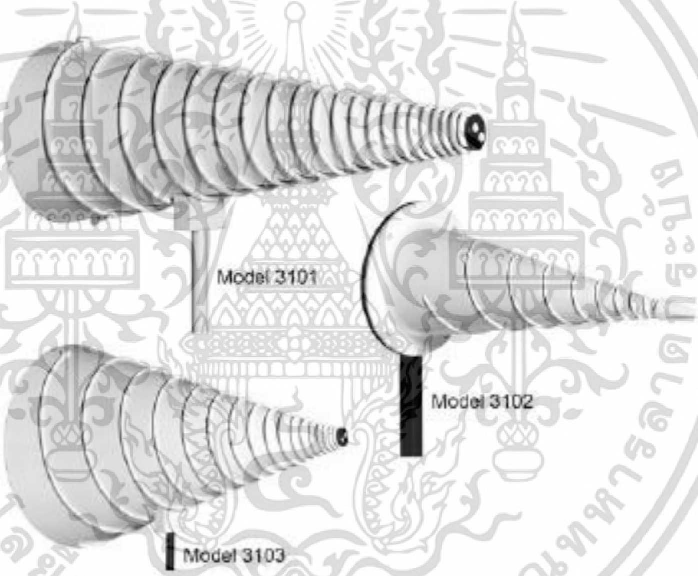
ภาคผนวก ก
คู่มือการใช้สายอากาศทรวงกรวยบิดเกลียวรูปก้นหอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Model 3100 Series

Conical Log Spiral Antennas

User Manual



ETS-LINDGREN™
An ESCO Technologies Company

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.0 Introduction

The **ETS-Lindgren Model 3100 Series Conical Log Spiral** antennas are circularly polarized broadband antennas covering the frequency range of 100 MHz to 10 GHz. This family of antennas includes the Model 3101, Model 3102, and the Model 3103. The Conical Log Spiral antennas are designed specifically for EMI measurements and compliance testing as called for in various Military Standards.

Each antenna is constructed of a fiberglass cone upon which two logarithmic spirals of 50-ohm coaxial cable are securely fastened. Outside windings improve heat dissipation. The coaxial connectors are located in the phenolic base plate of the cone. A 1/4–20 adapter for a tripod or other mounting configuration is attached to the antenna near its horizontal center of gravity or at the antenna base plate.

The Conical Log Spiral antennas receive both circular polarized and linear polarized fields (with a 3-dB variance for linear fields) under normal operating conditions.

Model 3101, Model 3102, and Model 3103 are right-hand wound, and transmit and receive a left-hand circularly polarized wave. Model 3101L, Model 3102L, and Model 3103L are left-hand wound, and transmit and receive a right-hand circularly polarized wave.

During the manufacturing process each antenna is individually calibrated at 1 meter per SAE ARP 958. Typical antenna data is included beginning on page 21. Actual factors and a signed *Certificate of Calibration Conformance* are shipped with each antenna.

Standard Configuration

- Left-hand circular polarization
- Support rod
- Support base configured to accept ETS-Lindgren or other tripod mount with standard 1/4–20 threads

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.0 Maintenance

CAUTION

Before performing any maintenance, follow the safety information in the ETS-Lindgren *Product Information Bulletin* included with your shipment.

Maintenance of the Conical Log Spiral antennas is limited to external components such as cables or connectors.

If you have any questions concerning maintenance, contact ETS-Lindgren Customer Service.

Maintenance Recommendations

If the Conical Log Spiral antennas are used outdoors, periodically check them for water accumulation. Water has a high dielectric constant and can alter the performance of the antenna.

Annual Calibration

See the *Product Information Bulletin* included with your shipment for information on ETS-Lindgren calibration services.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.0 Specifications

Electrical Specifications

	Model 3101	Model 3102	Model 3103
Frequency Range:	200 MHz–1 GHz	1 GHz–10 GHz	100 MHz–1 GHz
Impedance:	50 Ω	50 Ω	50 Ω
VSWR (Avg):	2.4:1	1.6:1	1.9:1
Maximum Continuous Power:	100 Watts	50 Watts	100 Watts
Short-Term Peak Power:	150 watts	100 Watts	150 Watts
Polarization:	Circular		
Connector:	Type N female		

Physical Specifications

	Model 3101	Model 3102	Model 3103
Length:	81.3 cm 32.0 in	38.1 cm 15.0 in	102.0 cm 40.0 in
Diameter:	33.0 cm 13.0 in	12.7 cm 5.0 in	66.0 cm 26.0 in
Weight:	4.5 kg 10.0 lb	3.6 kg 8.0 lb	10.0 kg 22.0 lb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

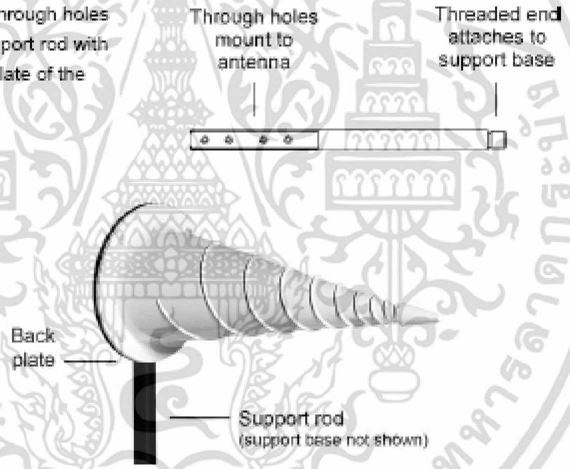
4.0 Mounting Instructions

MODEL 3102

To use the included adapters to mount the Model 3101 to a 4-TR Tripod, a 7-TR Tripod, or a mast:

➔ Do not cross thread any connections or permanent could occur.

1. Align the through holes on the support rod with the back plate of the antenna.

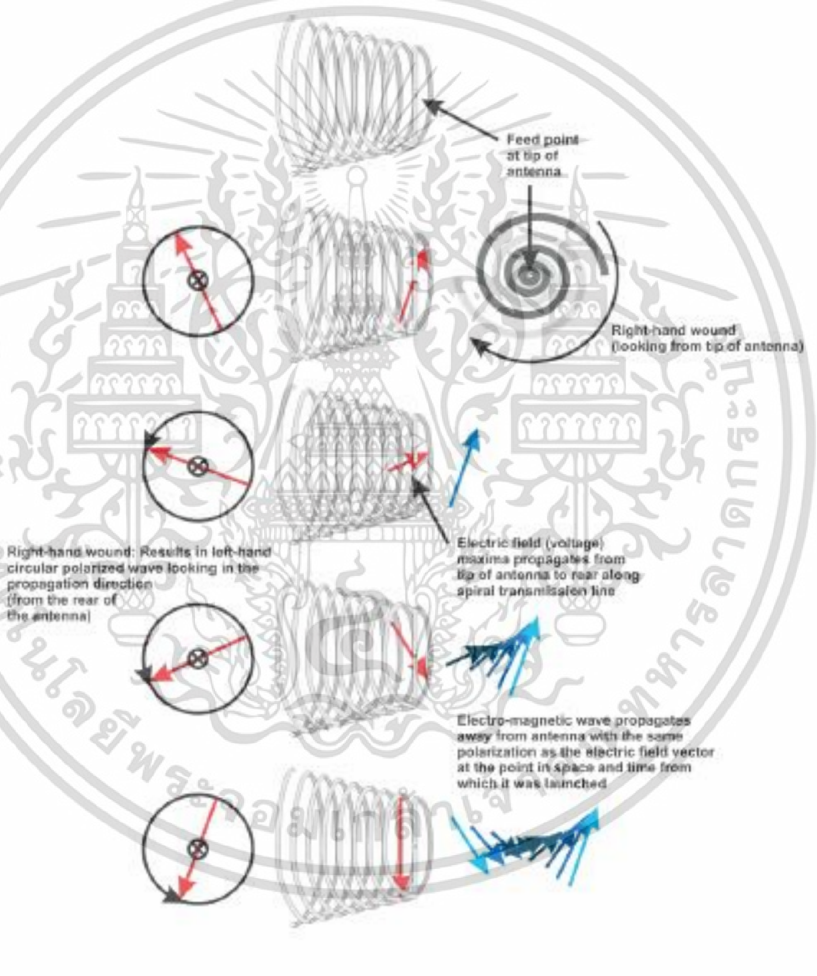


2. Insert the mounting screws (included) into the through holes and back plate. Tighten to secure the rod into place. Do not over tighten.
3. Attach the support base to the 4-TR, 7-TR, or mast.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.0 Circular Polarization

Left-Hand Circular Polarization



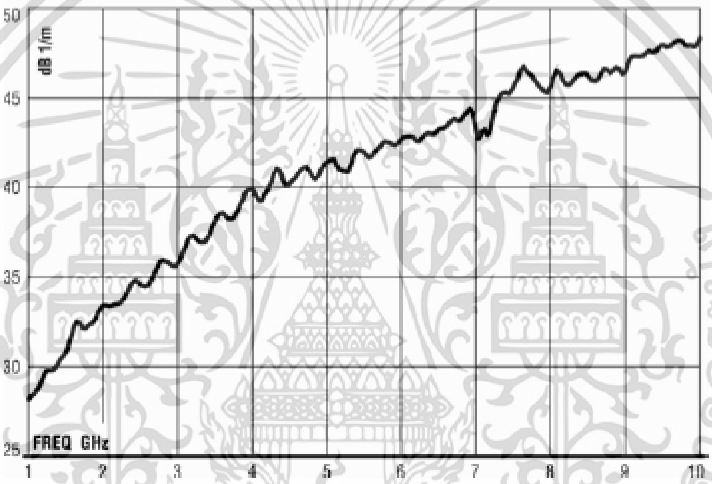
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.0 Typical Data

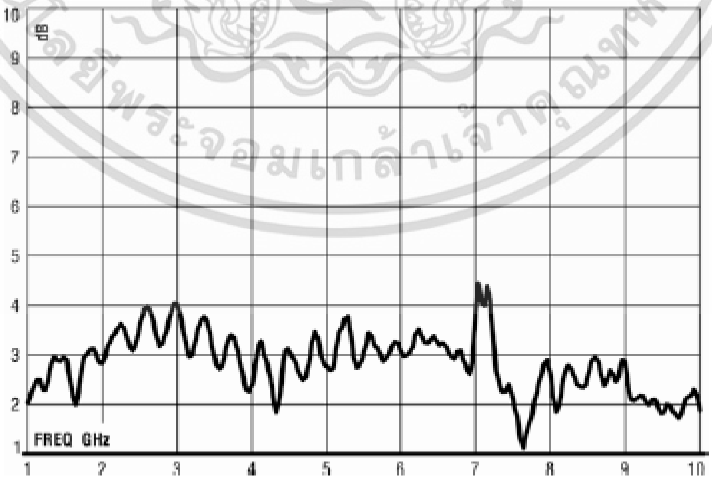
Typical data measurements taken at one-meter spacing.

Model 3102

MODEL 3102 ANTENNA FACTOR

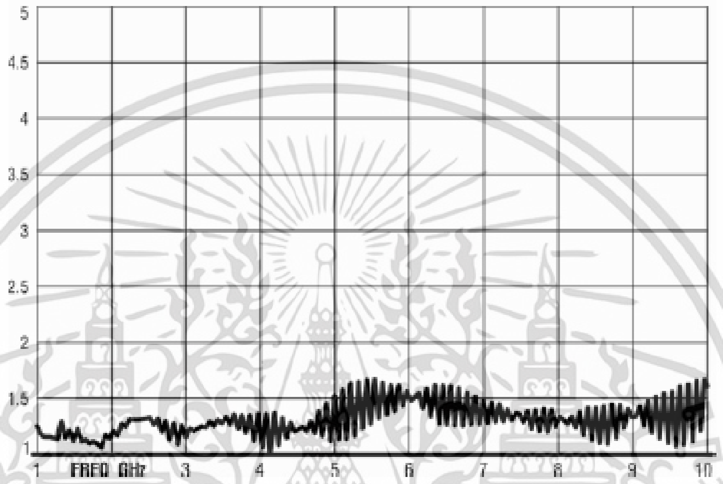


MODEL 3102 GAIN

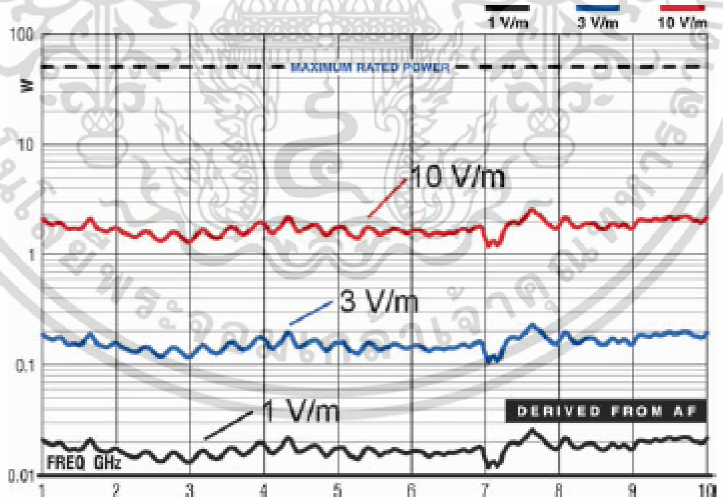


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODEL 3102 VSWR



MODEL 3102 FORWARD POWER – 1 METER



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

[1] **อรรถวุฒิ วานิช**, พิชญ สุพรรณกูล และ สถาพร พรหมวงศ์, “การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับสัญญาณแถบกว้าง,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (EENET) ครั้งที่ 8, หน้า 337-380, 25-27 พฤษภาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EEIT2016

Innovation for Sustainability Entrepreneur

25-27 May 2016, Duangjitt Resort & Spa,
Patong Beach, Phuket

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

The 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology

Conference Topics

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DS)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน(ES)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)
- งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

EENET 2016

PTS Combination
AD Training Didactic Systems Teachware
ptt Group
USE FLO-LINE
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ...เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ...ห้ามมิให้...และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร...ที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับสัญญาณแถบกว้าง

Application of Knife-Edge Diffraction Model for Wideband Signal

อรรถวุฒิ วานิช, พิชญ สุพรรณกูล และ สถาพร พรหมวงศ์
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 5054
E-mail: attawut_vanich@hotmail.com, pizzapich@gmail.com, kensathaporn@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับสัญญาณแถบกว้าง โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 3 GHz เป็นสัญญาณส่งแถบกว้าง ได้พิจารณาแบบจำลองขอบเหลี่ยมคมให้อยู่ในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณเชิงซ้อน นอกจากนั้น ได้นิยามอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างที่อยู่บนพื้นฐานกำลังเฉลี่ย และท้ายสุดได้ศึกษาความเที่ยงตรงของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมโดยเปรียบเทียบกับผลการวัด จากผลที่ได้มีค่าผิดพลาดรากของกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 1.04 dB

คำสำคัญ: แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม, สัญญาณแถบกว้าง, อัตราขยายการเลี้ยวเบน

Abstract

In this paper, the knife-edge diffraction model is applied for wideband signal. The rectangular passband waveform with frequency ranged from 1 to 3 GHz is used as wideband transmitted signal. The knife-edge diffraction model is analyzed in the term of complex channel frequency transfer function. In addition, the wideband diffraction gains based on average power is defined. Finally, the accuracy of knife-edge diffraction model is studied by comparing with the measurement results. From the result, the root mean square error (RMS) is 1.04 dB.

Keywords: Knife-edge diffraction model, Wideband signal, Diffraction gain

1. บทนำ

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีการสื่อสารแถบกว้างได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการการสื่อสารที่มีความจุมากและอัตราการส่งข้อมูลสูง ทำให้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งภายในและภายนอกอาคาร ซึ่งอาจจะมีสภาวะแวดล้อมที่สัญญาณแถบกว้างถูกบดบังจากวัสดุหรือสิ่งกีดขวางต่าง ๆ

แบบจำลองการเลี้ยวเบนเป็นแบบจำลองที่มีความสำคัญสำหรับนำมาใช้หาคุณสมบัติและวิเคราะห์ระบบการสื่อสารไร้สาย ในการศึกษาการเลี้ยวเบน ทฤษฎีที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนคือหลักการของฮอยเกนส์-เฟรสเนล (Huygens-Fresnel) [1] ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าแต่ละจุดบนหน้าคลื่นสามารถพิจารณาเป็นแหล่งกำเนิดที่มีการแผ่กระจายคลื่นใหม่ได้ ต่อมาได้มีการพัฒนาสูตรอินทิกรัลของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff) [2] สำหรับการอินทิเกรตในหนึ่งมิติ ซึ่งสูตรนี้จะกลายเป็นแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมที่นิยมใช้หาคุณสมบัติและวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของสัญญาณแถบแคบ [3]

บทความนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับสัญญาณแถบกว้าง โดยใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 3 GHz เป็นสัญญาณส่งแถบกว้าง ได้พิจารณาแบบจำลองขอบเหลี่ยมคมให้อยู่ในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณเชิงซ้อน ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหารูปคลื่นของสัญญาณที่รับได้ นอกจากนั้น ได้นิยามอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างที่อยู่บนพื้นฐานกำลังเฉลี่ย และท้ายสุดได้ศึกษาความเที่ยงตรงของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมโดยเปรียบเทียบกับผลการวัด จากผลที่ได้มีค่าผิดพลาดรากของกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 1.04 dB

ส่วนที่เหลือของบทความจะมีเนื้อหาดังต่อไปนี้ ในหัวข้อที่ 2 เป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับสัญญาณแถบกว้าง ต่อมาในหัวข้อที่ 3 ได้แสดงผลที่ได้จากแบบจำลองการเลี้ยวเบนของเหลี่ยมคมเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัด และท้ายสุดได้สรุปผลไว้ในหัวข้อที่ 4

2. แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแถบกว้าง

ในการศึกษาปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของสัญญาณแถบกว้าง ได้ใช้รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 3 GHz เป็นสัญญาณส่งแถบกว้าง และประยุกต์ใช้แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณเชิงซ้อน ทำการคำนวณหาสัญญาณที่รับได้ หลังจากนั้น นำสัญญาณส่งและสัญญาณที่รับได้มาวิเคราะห์หาอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้าง โดยนิยามเป็นอัตราของกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้ต่อกำลังเฉลี่ยของสัญญาณส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 สัญญาณส่งแถบกว้าง

สัญญาณส่งแถบกว้างที่พิจารณาในบทความนี้เป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม โดยมีรูปคลื่นในโดเมนเวลาและฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมนิยามเป็น

$$v_t(t) = \frac{A}{f_b}\left[f_H \operatorname{sinc}(2f_H t) - f_L \operatorname{sinc}(2f_L t)\right] \qquad (1)$$

$$V_t(f) = \begin{cases} \dfrac{A}{2f_b} & \left\| f \right| - f_c \right| \le \dfrac{f_b}{2} \\ 0 & \left\| f \right| - f_c \right| > \dfrac{f_b}{2} \end{cases} \qquad (2)$$

เมื่อ t เป็นเวลา f เป็นความถี่ A เป็นแอมพลิจูด f_b เป็นแบนด์วิดท์ f_c เป็นความถี่กลาง f_L เป็นความถี่ต่ำสุด f_H เป็นความถี่สูงสุด และ

$$\operatorname{sinc}(x) = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ \dfrac{1}{\pi x}\sin(\pi x) & x \ne 0 \end{cases} \qquad (3)$$

2.2 ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณเชิงซ้อน

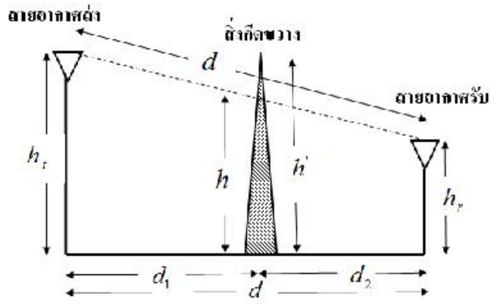
หลักการของฮอยเกนส์-เฟรสเนลได้อธิบายปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนไว้ว่า แต่ละจุดบนหน้าคลื่นสามารถพิจารณาเป็นแหล่งกำเนิดของการแผ่กระจายคลื่นใหม่ได้ [1] ซึ่งได้พัฒนามาเป็นแบบจำลองการเลี้ยวเบนโดยใช้สูตรอินทิกรัลของเคอร์ชอฟฟ์ [2] ทำการพิจารณาสูตรอินทิกรัลนี้ในหนึ่งมิติจะได้แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม ซึ่งจะนำมาพิจารณาในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณเชิงซ้อน รูปเรขาคณิตของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 ฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณเชิงซ้อนของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสามารถเขียนได้เป็น

$$H_d(f) = \frac{1}{2}(1+j)\int_{v(f)}^{\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}x^2}\,dx \qquad (4)$$

โดยที่ฟังก์ชัน $v(f)$ นิยามเป็น

$$v(f) = \frac{\sqrt{2}(h' - h)}{F_1(f)} \qquad (5)$$

เมื่อ h' เป็นความสูงของสิ่งกีดขวาง h เป็นความสูงของเส้นตรงจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับที่ระยะทางเดียวกันกับสิ่งกีดขวาง และ $F_1(f)$ เป็นรัศมีของเขตเฟรสเนลแรก



รูปที่ 1 เรขาคณิตของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม

ความสูงของเส้นตรงจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับคำนวณได้จาก

$$h = \frac{d_2 h_t + d_1 h_r}{d} \qquad (6)$$

เมื่อ h_t เป็นความสูงของสายอากาศส่ง h_r เป็นความสูงของสายอากาศรับ d เป็นระยะทางระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับ d_1 เป็นระยะทางจากสายอากาศส่งถึงสิ่งกีดขวาง และ d_2 เป็นระยะทางจากสายอากาศรับถึงสิ่งกีดขวาง

รัศมีของเขตเฟรสเนลแรกนิยามเป็น

$$F_1(f) = \sqrt{\frac{c d_1 d_2}{f d'}} \qquad (7)$$

เมื่อ c เป็นความเร็วแสง d' เป็นความยาวของเส้นตรงจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ นิยามเป็น

$$d' = \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2} \qquad (8)$$

2.3 สัญญาณที่รับได้

ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้คำนวณจากผลคูณระหว่างความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่งกับฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณเชิงซ้อนของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม โดยสามารถเขียนได้เป็น

$$V_r(f) = V_t(f) \cdot H_d(f) \qquad (9)$$

รูปคลื่นของสัญญาณที่รับได้ในโดเมนเวลาคำนวณได้จากการแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับของความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่ง ซึ่งจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi ft} df \qquad (10)$$

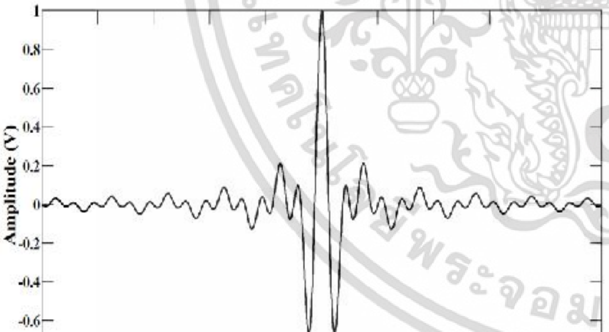
2.4 อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้าง

ได้นิยามอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างอยู่บนพื้นฐานกำลังเฉลี่ย นั่นคือ เป็นอัตราระหว่างกำลังเฉลี่ยของสัญญาณรับต่อกำลังเฉลี่ยของสัญญาณส่ง อัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างในหน่วย dB สามารถเขียนได้เป็น

$$G = 10\log\left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} v_r^2(t)dt}{\int_{-\infty}^{\infty} v_t^2(t)dt}\right] \qquad (11)$$

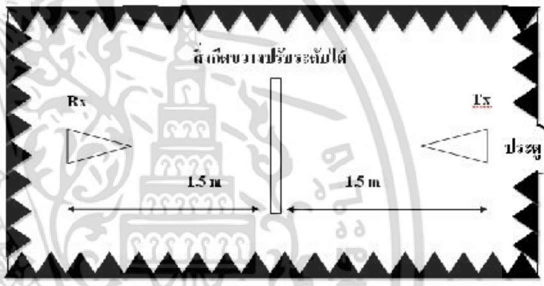
3. การเปรียบเทียบกับผลการวัด

ได้กำหนดพารามิเตอร์ของสัญญาณส่งแถบกว้างเป็น ความถี่ต่ำสุด f_L เท่ากับ 1 GHz ความถี่สูงสุด f_H เท่ากับ 3 GHz ดังนั้น สัญญาณนี้จะมีแบนด์วิดท์ f_b เท่ากับ 2 GHz และความถี่กลาง f_c เท่ากับ 2 GHz กำหนดให้มีแอมพลิจูดสูงสุด A เท่ากับ 1 V รูปคลื่นในโดเมนเวลาของสัญญาณส่งแถบกว้างนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 จากรูปจะเป็นได้ว่า สัญญาณส่งมีแอมพลิจูดสูงสุด 1 V ที่เวลา t เท่ากับ 0 s



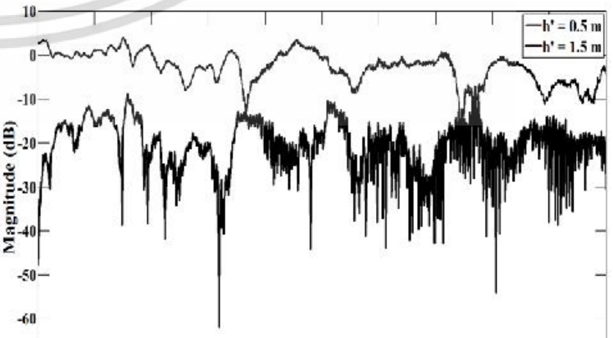
รูปที่ 2 รูปคลื่นสัญญาณส่งแถบกว้างในโดเมนเวลา

ในการศึกษาความเที่ยงตรงของแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับสัญญาณแถบกว้าง ได้ทำการวัดช่องสัญญาณการเลี้ยวเบนในห้องไร้การสะท้อนกว้าง 3.5 m ยาว 6 m สูง 2.95 m โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์วัดฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณเชิงซ้อนในเทอมของ S_{21} ที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 3 GHz กำหนดจำนวนจุดความถี่เป็น 1601 จุด ใช้สายอากาศทรงกรวยบิดเกลียวรูปก้นหอยรุ่น 3102 ของบริษัท ETS-Lindgren มีแบบรูปการแผ่กระจายแบบมีทิศทาง อัตราขยาย 3 dB และการโพลาไรซ์แบบวงกลม เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับต่ออยู่ที่พอร์ต 1 และ 2 ตามลำดับ ความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ h_t, h_r เท่ากับ 1 m ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ d เท่ากับ 3 m มีสิ่งกีดขวางเป็นแผ่นอะลูมิเนียมอยู่ตรงกลาง นั่นคือ d_1, d_2 เท่ากับ 1.5 m แบบจำลองการวัดได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 โดยที่สิ่งกีดขวางอะลูมิเนียมถูกออกแบบให้สามารถปรับความสูงได้ 15 ระดับ คือ h' มีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 1.5 m โดยปรับความสูงได้ระดับล่ะ 0.1 m แผ่นอะลูมิเนียมหนา 2 mm และมีความกว้างเป็น 2.4 m ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งในห้องไร้การสะท้อน ในการคำนวณหาฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนของช่องสัญญาณการเลี้ยวเบน จะต้องใช้ข้อมูลการวัดช่องสัญญาณที่ไม่มีสิ่งกีดขวางมานอมัลไลซ์เพื่อตัดคุณสมบัติของสายอากาศส่ง สายอากาศรับ และการสูญเสียเชิงวิถีออกไป



รูปที่ 3 แบบจำลองการวัด

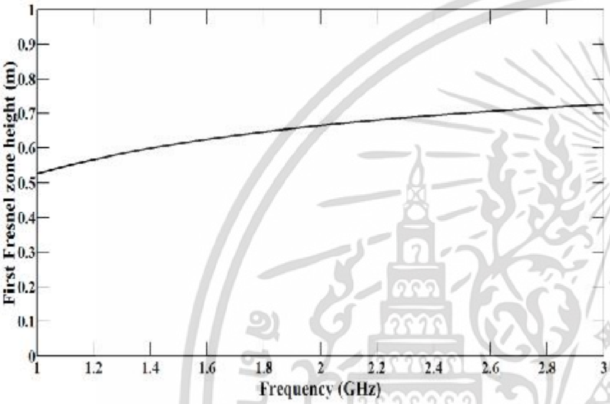
รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณการเลี้ยวเบนที่วัดได้เมื่อมีสิ่งกีดขวางสูง 0.5 และ 1.5 m และได้นอมัลไลซ์ตัดผลกระทบของสายอากาศส่ง สายอากาศรับ และการสูญเสียเชิงวิถีออกไป จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่ความสูงของสิ่งกีดเป็น 1.5 m ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณจะเริ่มลดลงเมื่อเทียบกับความสูงของสิ่งกีดขวางเป็น 0.5 m อย่างชัดเจน



รูปที่ 4 ขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณที่วัดได้

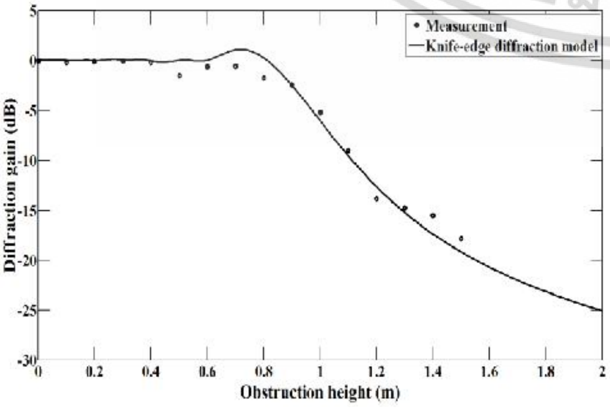
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาสภาวะแวดล้อมการเลี้ยวเบน จะทำการพิจารณาความสูงของเขตเฟรสเนลแรก รูปที่ 5 แสดงความสูงของเขตเฟรสเนลแรก ความสูงของเขตเฟรสเนลแรกมีค่าต่ำสุดเป็น 0.53 m นั่นหมายความว่า เมื่อสิ่งกีดขวางมีความสูงน้อยกว่า 0.53 m จะมีผลกระทบต่อสัญญาณน้อย แต่เมื่อสิ่งกีดขวางมีขวางสูงเป็น 0.53 m จะเริ่มปิดกั้นสัญญาณที่ความถี่ 1 GHz และปิดกั้นแถบความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเมื่อสิ่งกีดขวางมีความสูงเป็น 0.73 m ซึ่งเป็นความสูงของเขตเฟรสเนลแรกที่มีค่าสูงสุด จะทำให้สิ่งกีดขวางปิดกั้นสัญญาณแถบกว้างในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 3 GHz อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 5 ความสูงของเขตเฟรสเนลแรก

รูปที่ 6 แสดงอัตราขยายการเลี้ยวเบนของสัญญาณแถบกว้างที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม จากรูปจะเห็นได้ว่าอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างที่ได้จากแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับการวัด โดยจะมีค่าผิดพลาดอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.04 ถึง 2.03 dB ค่าผิดพลาดรากของกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 1.04 dB



รูปที่ 6 อัตราขยายการเลี้ยวเบนของสัญญาณแถบกว้าง

4. สรุป

บทความนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมสำหรับสัญญาณแถบกว้าง โดยพิจารณาแบบจำลองให้อยู่ในเทอมของฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ช่องสัญญาณเชิงซ้อน จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าอัตราขยายการเลี้ยวเบนแถบกว้างที่ได้จากแบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับการวัด โดยมีค่าผิดพลาดรากของกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 1.04 dB ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมนี้สามารถนำมาใช้ประมาณหาอัตราขยายการเลี้ยวเบนสำหรับสัญญาณแถบกว้างได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

[1] J. D. Parson, *The mobile radio propagation channel*, 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd, 2000.

[2] H. D. Hristov, *Fresnel zones in wireless link, zone plate lenses and antennas*, Artech House, 2000.

[3] M. Rieche, A. Ihlow, T. Heyn, F. P.-Fontan and G. D. Galdo, "Land mobile satellite propagation characteristics from knife-edge diffraction modeling and hemispheric images," in *9th European Conference on Antenna and Propagation*, 2015, pp. 1-4.

อรรถวุฒิ วานิช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโท ที่ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สจล. สนใจด้านการทำแบบจำลองช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สาย

พิชญ สุพรรณกูล สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สจล. ทำงานวิจัยด้านการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

สถาพร พรหมวงศ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกจากสถาบันเทคโนโลยีโตเกียว ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สจล. ทำงานวิจัยด้านเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย และระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอรรถวุฒิ วานิช
วัน เดือน ปีเกิด	14 ตุลาคม 2529
ที่อยู่	194/3 หมู่ 4 ซอยรามอินทรา 19 ถ.รามอินทรา แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ที่ทำงาน	บริษัท ว. วานิช ฮาร์ดแวร์ จำกัด 194/2 หมู่ 4 ซอยรามอินทรา 19 ถ.รามอินทรา แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้